

Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
“ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР РОС-
СИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ”**

ИНФОРМАЦИОННЫЙ СБОРНИК

№ 45

Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов

Под редакцией
канд. геогр. наук А.А. Алексеевой

2018

Информационный сборник № 45. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов / под редакцией канд. геогр. наук А.А. Алексеевой. – М., 2018. – 148 с.

Дается краткое описание системы наукастинга осадков, функционирующей в режиме реального времени на основе последовательностей радарных полей в Гидрометцентре России. Расчетной основой системы является статистическая схема STEPS, построенная как мультипликативная каскадная модель с использованием технологии оптического потока. Демонстрируются результаты точечной и пространственной верификации результатов испытаний системы в теплый период года. Рассматриваются метод краткосрочного прогноза давления, приведенного к уровню моря по стандартной атмосфере (QNH), и два варианта расчета балла облачности – встроенному в постпроцессинг Unified Post Processor модели и по модифицированному методу, по территории Дальневосточного региона России по данным модели WRF-ARW с горизонтальным разрешением 15 км и результаты их испытаний. Приводятся результаты испытаний оперативной технологии прогноза гроз с различной пространственно-временной детальностью и заблаговременностью для Урало-Сибирского региона на основе прогностических данных моделей COSMO-Ru_Sib и NCEP(GFS) по универсальной методике построения прогностических решающих правил. Представлены результаты совместных испытаний технологии ансамблевых прогнозов на срок до 45 суток с недельной временной детализацией для первого прогностического месяца на основе моделей ПЛАВ (ГМЦ) и T63L25 (ГГО). Комплект выходной продукции включает глобальные прогностические поля (по сетке $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$) величины аномалии и вероятностей трех градаций (ниже нормы, норма, выше нормы) для пяти метеорологических характеристик: геопотенциала поверхности 500 гПа (H-500), давления на уровне моря (SLP), температуры воздуха на уровне 850 гПа (T-850) и у Земли (TRSF), а также интенсивности атмосферных осадков (PREC) для Северо-Евразийского региона. Излагаются результаты оперативных испытаний автоматизированного метода краткосрочного (до 72 ч) прогноза характеристик тропических циклонов (ТЦ) северо-западной части Тихого океана и реализующей его технологии HWRF-Ru. Представлено описание ансамблевого метода прогноза ледовых условий в Татарском проливе, Охотском и Беринговом морях, основанного на использовании статистического моделирования. В двух статьях излагаются агрометеорологические методы прогноза и результаты их испытаний: метода оценки условий вегетации и прогноза урожайности кукурузы с использованием спутниковой и наземной информации по субъектам Российской Федерации и синоптико-статистического метода долгосрочного прогноза урожайности яровой пшеницы по федеральным округам и России в целом. Приведены рекомендации ЦМКП Росгидромета о внедрении всех представленных методов.

Для научных работников в области синоптической метеорологии, гидродинамических, агрометеорологических, гидрологических и морских гидрологических прогнозов, специалистов службы прогноза погоды, аспирантов и студентов.

ОПЕРАТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ НАУКАСТИНГА ОСАДКОВ НА ОСНОВЕ РАДАРНЫХ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРИФИКАЦИИ ДЛЯ ТЕПЛОГО ПЕРИОДА ГОДА (МАЙ – СЕНТЯБРЬ 2017 ГОДА)

Введение

Понятие «наукастинг» (или прогноз текущей погоды) обычно ассоциируется с экстраполяцией тенденций, выявленных в данных последних наблюдений. Специфичность наукастинга при этом заключается в максимально детализированном описании состояния погоды и в прогнозировании этого состояния на ближайшие несколько часов с использованием только скорости и направления перемещения выделенной погодной системы в предположении, что на интервале прогноза каких-либо существенных погоды изменений не предвидится [3, <https://meteoinfo.ru/nowcasting>]. В зависимости от существенности изменений заблаговременность наукастинга, или интервал его полезности, составляет от нескольких минут до нескольких часов, с верхним пределом порядка шести часов [3, 5].

3

Ввиду того, что оценивается лишь скорость и направление перемещения, вполне удовлетворительными для прогнозирования оказываются статистические модели кусочно-линейной экстраполяции, учитывающие эмпирические пространственно-временные связи погодных структур разных масштабов. Для увеличения предсказуемости до 6–12 часов продукция наукастинга комбинируется с выходной продукцией численного прогноза погоды, и в этом случае говорят о сверхкраткосрочном прогнозе.

Возможность экономичной статистической экстраполяции и краткий срок прогноза отнюдь не означают тривиальности задачи наукастинга. Максимально детальное описание текущей погоды требует современных средств наблюдений с большой плотностью и соответствующих численных схем ассимиляции данных, учет неопределенности развивающегося процесса приводит к необходимости ансамблевых или вероятностных прогнозов, а частый цикл выпуска прогнозов невозможен без соответствующих компьютерных мощностей и скоростных сетей передачи данных. А так как основным объектом наукастинга является экстремальная погода, то существенно увеличивается стоимость и промахов, и ложных тревог.

Необходимо отметить, что развитие методологии и технологии наукастинга, наряду с развитием численных моделей высокого пространственного разрешения, стимулировало разработку новых методов верификации, учитывающих мезомасштабный характер процессов и явлений и, в особенности, направленность наукастинга на прогноз экстремальных погодных элементов [6, 9, 10, 12, <https://www.r-project.org>]. Были разработаны методы и компьютерные средства пространственной верификации (spatial verification), в которой наряду с традиционными показателями качества используются новые, в частности, окрестные (neighborhood) и объектно-ориентированные (feature, object-oriented) подходы с интерпретацией результатов верификации в терминах информативности и полезности. Для верификации экстремальных величин и предупреждений была разработана теория экстремальной зависимости случайных величин и предложены соответствующие индексы (extremal dependency indices). В течение последних десятилетий в мировой практике наукастинга накоплены разнообразные частные оценки качества, детализированные по погодным характеристикам, физико-географическим особенностям территорий, сезонам, развивающимся крупномасштабным ситуациям и т. д. Из наиболее общих оценок качества можно привести авторитетное заключение английских специалистов о полезности наукастинга осадков в обширных дождевых зонах в зимний период на срок до трех-четырёх часов, а в летних грозах лишь до одного-двух часов (<https://www.metoffice.gov.uk/learning/making-a-forecast/hours-ahead/nowcasting>).

Представленная статья содержит краткое описание развернутой в мае 2016 г. в Гидрометцентре России системы наукастинга осадков, функционирующей в режиме реального времени на основе последовательностей радарных полей, поступающих из Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) (<https://meteoinfo.ru/nowcasting>).

Вычислительной основой является статистическая схема STEPS (Short-Term Ensemble Prediction System) [7], построенная на принципах мультипликативной каскадной турбулентной модели, разработанной в 80-х годах прошлого века Лавджоем и Шерцером в приложении к осадкам и облачности [13]. В рамках расчетного алгоритма схемы решаются последовательно следующие задачи: формирование поля адвекции с помощью методов оптического потока, построение каскадов Фурье-разложением исходных полей с использованием полосового фильтра, воспроизведение эволюции во времени линейной моделью авторегрессии.

Схема STEPS генерирует как детерминированные, так и вероятностные прогнозы, при этом вероятностный прогноз строится на основе возмущений начальный каскадов, но может быть построен и с помощью небольшого количества лаговых серий прогнозов. В развернутой схеме вероятностные прогнозы составляются по трем лаговым сериям в той же цикличности, что и оперативные прогнозы, но в настоящее время размещаются только на вычислителе Гидрометцентра России. Для имитации неопределенности радарных наблюдений

используется датчик случайных чисел заданной дисперсии, поэтому при повторных стартах от одной и той же пары начальных полей серии незначительно отличаются друг от друга. Ввиду этого схема STEPS является принципиально стохастической моделью, однако ниже такие серии прогнозов будут для краткости называться детерминированными.

В статье приводятся оценки успешности детерминированных прогнозов в теплое время года на 2 ч 30 мин с 10-минутной временной детализацией. Из-за дефицита стационарных наблюдений с высокой временной дискретностью на данном этапе в качестве «эталонов» для верификации используются исключительно поля радаров, являющие одновременно начальными полями для схемы STEPS. Для оценки результатов наукастинга использованы рекомендации ВМО по точечной верификации [8, 12] и методы пространственной верификации, позволяющие получать информативные оценки полезности прогнозов с одновременным снижением опасности «двойного штрафа» [9, 10]. Область верификации охватывает зоны обзора девяти доплеровских радаров ДМРЛ-С на Европейской территории России: Курск (RAKU), Тула (RATL), Внуково (RAVN), Воейково (RAVO), Брянск (RUDB), Кострома (RUDK), Смоленск (RUDL), Нижний Новгород (RUDN), Валдай (RUWJ). Оценки успешности прогнозов рассчитываются индивидуально для каждого радара.

Верификация результатов проведена с помощью библиотек языка R, включая тестовый математический пакет пространственной верификации SpatialVx. Для визуализации полей использован графический комплекс Grads.

1. Условия верификации

По периоду верификации с 1 мая по 30 сентября 2017 года было составлено порядка 20 тысяч прогнозов (из примерно 22 тысяч максимально возможных), выпускавшихся через каждые 10 минут.

Область радиолокационного обзора представляет собой круг, вписанный в квадрат размером 500×500 км, шаг исходной сетки равен 1 км, но шаг сетки наукастинга примерно в два раза грубее при размерности прогностического поля, равной 256×256 .

Ввиду значительного увеличения погрешности дистанционного зондирования при удалении от радара на расстояние более полутора сотен километров, точечная верификация ограничена квадратной областью со стороной около 120 км, что означает снижение размерности поля до 126×126 , или до 24 % точек общей области.

Следует отметить, что точечная оценка качества прогнозов в узлах сетки двухкилометрового разрешения является очень строгой и не всегда оказывается показательной. На практике чаще прибегают к интегральным характеристикам по пространству, получая более благоприятные оценки качества «в среднем по полю», но теряют при этом важные детали пространственных структур [8].

Пространственная верификация проведена по полному полю в 256×256 точек.

Ввиду особенностей статистического распределения 10-минутных сумм осадков, из верификации исключаются те точки пар полей «прогноз-наблюдение», в которых значения и прогностических, и наблюдаемых величин меньше 0,05 мм/ч. Если хотя бы в одной точке это условие нарушается, пара не исключается. Выбор критического порога интенсивности делает верификацию и ее результаты условными в статистическом смысле, при этом объемы выборок сокращаются примерно до 10–15 % от полного набора наблюдений, превращая «оставшиеся осадки» в относительно редкое явление. Следует иметь в виду, что условными оказываются и все статистические характеристики с суммированием: средняя ошибка, средняя квадратическая ошибка, коэффициент корреляции и т. д.

2. Используемые показатели точечной верификации

Перечислим статистические характеристики результатов наукастинга, разделив их условно на общие характеристики, непрерывные и категоризованные показатели качества, приводя их английские сокращения и названия, а также – при наличии – их русскоязычные соответствия:

1) общие статистические характеристики по всему периоду верификации (**ACCU** – накопленная сумма осадков, **AVER** – среднее значение, **MAX** – максимальное значение);

2) показатели качества для непрерывных предиктантов (**ME** – средняя ошибка, **RMSE** – средняя квадратическая ошибка, **COR** – коэффициент корреляции);

3) показатели качества для категоризованных предиктантов, рассчитываемые по таблицам сопряженности (табл. 1):

PC = $(a+d)/n$ – общая оправдываемость (Proportion Correct);

BIAS = $(a+b)/(a+c)$ – смещение, отношение повторяемостей, систематическая ошибка (Bias);

H = $a/(a+c)$ – доля попаданий, предупреденность явления (Hit Rate);

FAR = $b/(a+b)$ – отношение ложных тревог (False Alarm Ratio);

F = $b/(b+d)$ – доля ложных тревог (False Alarm Rate);

TS = $a/(a+b+c)$ – оценка угрозы, критический индекс успешности, индекс успешности (Threat Score);

ETS = **GSS** = $(a-a_{ref})/(a-a_{ref}+b+c)$ – беспристрастная оценка угрозы, критерий Гилберта, критический индекс успешности относительно случайного попадания (Equitable Threat Score, Gilbert Skill Score), $a_{ref} = (a+b)(a+c)/n$;

PSS = **H** – **F** – критерий Пирса, критерий Пирса-Обухова Peirce Skill Score;

EDI = $(\log F - \log H)/(\log F + \log H)$ – индекс экстремальной зависимости (Extremal Dependence Index).

Таблица 1. Таблица сопряженности прогнозов и наблюдений явления, наличие которого определено превышением порога thr ($\geq thr$), а отсутствие – неравенством $< thr$

		Наблюдение		Сумма
		$\geq thr$	$< thr$	
Прогноз	$\geq thr$	a	b	a+b
	$< thr$	c	d	c+d
Сумма		a+c	b+d	n

Примечание. Обозначения, приведенные в таблице: **a** – количество соответствующих случаев верных прогнозов наличия явления; **b** – количество соответствующих случаев верных прогнозов ложных тревог; **c** – количество пропусков цели; **d** – количество соответствующих случаев верных-прогнозов отсутствия; **n** – общее количество пар.

Общие характеристики рассчитываются отдельно по полям прогнозов и по полям наблюдений, остальные характеристики рассчитываются по парам полей прогноз – наблюдение. Для определения категоризованных предиктантов использованы шесть порогов, нестрогое превышение которых выделяет категорию, или «явление»: 0,5, 1, 2, 4, 8, 12 мм/ч. В общей сложности, с учетом 15 прогностических сроков (на 10, 20, ..., 150 мин) и шести порогов, рассчитывается 1230 полей статистических характеристик и показателей качества для каждого радара.

Для обобщенной характеристики каждого поля рассчитываются **суммарные статистики**:

min – минимальное значение;

q25 – квантиль 25 % (первый квартиль);

median – медиана (второй квартиль);

mean – среднее арифметическое значение;

q75 – квантиль 75 % (третий квартиль);

max – максимальное значение;

IQR – интерквартильный размах ($q75 - q25$);

std – стандартное отклонение;

NA's – количество точек поля с вырожденными значениями (inf, NaN);

valid – количество точек с невырожденными значениями.

Так как квартили выделяют четверти от общего количества точек поля, то они оказываются простейшими пространственными характеристиками значений показателей качества, что используется ниже для определения информативности наукастинга в зависимости от заблаговременности и порога. При расчете некоторых показателей могут возникать вырожден-

ные значения (деление на нуль или логарифм нуля), что свидетельствует, в первую очередь, о недостаточном объеме выборки для оценок качества указанным показателем.

Однако пространственная организация областей вырожденности может содержать дополнительную информацию, например об ослаблении луча или о влиянии местных препятствий («местников»).

2.1. Общие статистические характеристики полей наблюдений и прогнозов

Одним из основных методов оценки качества радарных осадков является сравнение накопленных осадков за длительные периоды времени с соответствующими суммами, полученными наземными средствами наблюдений. В частности, суточные и полусуточные радиолокационные и стационарные суммы осадков служат для калибровки ДМРЛ сети ЦАО и для согласования текущих радарных данных с результатами наземных наблюдений [4].

Так как 10-минутные радарные осадки выражены в единицах к мм/час, то результаты их суммирования по часам должны уменьшаться в шесть раз, что необходимо учитывать при сопоставлении с фактическими величинами сумм осадков таких характеристик, как ACCU, ME, RMSE.

Рассмотрим суммарные осадки по радарным данным и по результатам работы системы наукастинга (рис. 1). Отчетливо видно большое разнообразие полей сумм и по величине, и по структуре, при этом наличие лучей и больших секторов с контрастными значениями свидетельствует о сильном влиянии местников. Накопленные суммы радарных осадков можно сопоставить с фактическими данными месячных и сезонных климатологических обзоров (например, [15]). Так, по Москве за пять месяцев (май-сентябрь) 2017 года суммы осадков составили 430 мм, что соответствует $430 \times 6 = 2580$ единиц палитры рис. 1. Как видно, соответствующие цвета палитры окружают область вокруг Москвы и северо-западный сектор на центральной панели (радар RAVN, Внуково).

Что касается пространственной структуры, то наличие больших зон помех сильно усложняет прогноз экстраполяцией для радаров RUDN (Нижний Новгород), RATL (Тула) и RUDB (Брянск). Помимо влияния местников, наблюдается эффект ослабления, при котором проявляются кольцевые структуры с ослаблением к периферии интенсивности осадков, как это заметно практически по всем радарам, но особенно по RUDK (Кострома) и RAVN (Внуково).

Рассмотрим рис. 2 с накопленной условной суммой прогностических осадков для тех же радаров и для заблаговременности 10 мин. Отчетливо видно, что фильтр схемы STEPS сглаживает и отчасти устраняет дефекты радарных наблюдений.

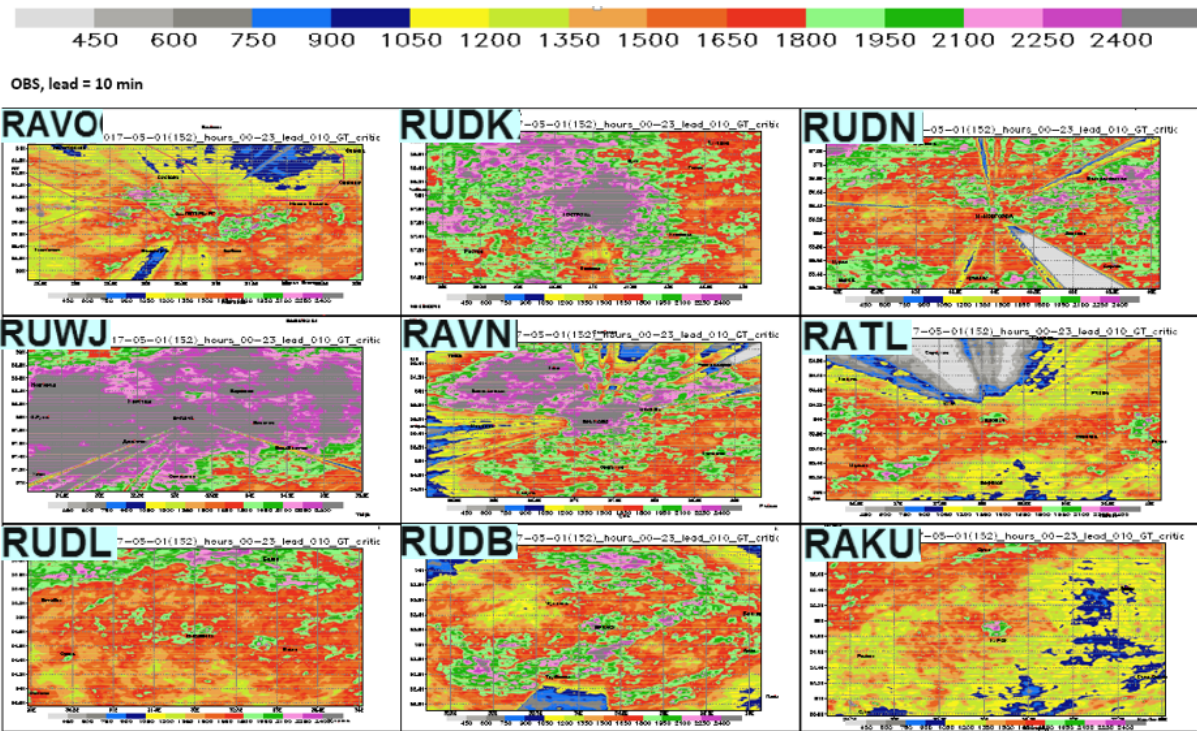


Рис. 1. Накопленные суммы радарных осадков (умноженные на 6) за период 01.05–30.09.2017 по радарам, развернутым на Европейской территории России. Единица измерения – [мм], градуировка палитры – [мм·6]. Суммирование проводится по тем срокам, по которым имеются синхронизированные прогнозы заблаговременностью 10 минут.

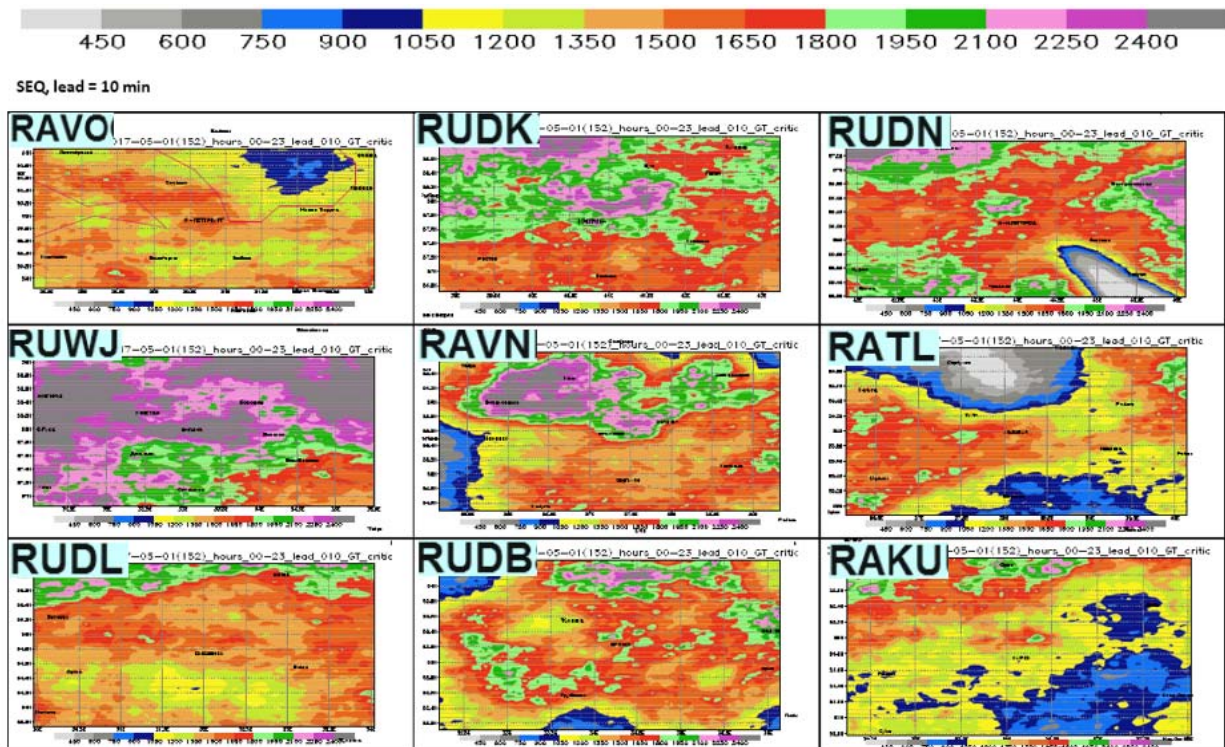


Рис. 2. Накопленные суммы прогностических осадков (умноженные на 6) за период 01.05 – 30.09.2017, полученных с помощью схемы STEPS для радаров на ЕТР. Единица измерения – [мм], градуировка палитры – [мм·6]. Суммирование проводится по тем срокам, по которым имеются синхронизированные радарные наблюдения.

Подтверждение содержится в таблицах суммарных статистик (табл. 2) для синхронизованных полей, в которых красным цветом отмечены выбросы в числовых значениях. Эти выбросы, которые в разной степени проявляются в данных радаров RAKU, RAVN, RAVO, RUDK, RUDN, RUWJ, носят локализованный характер, так как находятся за пределами третьего квартиля и, в частности, не критично влияют на интерквартильный размах и на значения стандартного отклонения, кроме, возможно, радара RAVN (Внуково).

Таблица 2. Суммарные характеристики полей полных сумм осадков для синхронизованных радарных (OBS) и прогностических (SEQ) данных с заблаговременностью 10 мин

	min	q25	med	mean	q75	max	std
RAKU, Курск							
OBS	703	1162	1317	1347	1510	7020	254
SEQ	705	1034	1197	1280	1495	3140	339
RATL, Тула							
OBS	154	1091	1383	1298	1595	2560	424
SEQ	301	960	1257	1240	1562	2263	388
RAVN, Внуково							
OBS	36	1504	1769	1766	2040	138059	1227
SEQ	620	1423	1609	1644	1889	2802	396
RAVO, Воейково							
OBS	524	1241	1429	1436	1607	11576	334
SEQ	841	1282	1400	1377	1498	2329	181
RUDB, Брянск							
OBS	439	1448	1667	1629	1853	2955	339
SEQ	534	1393	1599	1564	1767	2847	313
RUDK, Кострома							
OBS	892	1740	1907	1948	2117	4830	310
SEQ	1296	1678	1820	1852	1991	2657	235
RUDL, Смоленск							
OBS	1130	1513	1638	1666	1791	3007	213
SEQ	1011	1399	1509	1552	1656	2377	237
RUDN, Нижний Новгород							
OBS	13	1583	1751	1683	1911	7104	433
SEQ	93	1624	1763	1739	1933	2809	378
RUWJ, Валдай							
OBS	731	2112	2352	2317	2544	25105	406
SEQ	1328	2021	2247	2218	2443	3225	326

Примечание. Красным цветом выделены значения для радаров, в которых были обнаружены сильно завышенные величины – «выбросы», зеленым – подозрительные минимальные значения.

Подозрительными кажутся и слишком малые значения, которые выделены зеленым цветом: радары RAVN, RUDN. Во всех этих случаях фильтр STEPS действует робастно, малые значения завышая, а высокие занижая, при этом выбросы попросту срезает. По значе-

ниям всех квантилей для прогностических полей можно сделать вывод, что статистическая модель наблюдаемое количество осадков систематически занижает примерно на 15 мм, что для пяти теплых месяцев является незначительной погрешностью.

2.2. Непрерывные показатели качества

Продемонстрируем поля средней ошибки (ME) и коэффициента корреляции (COR).

Средняя ошибка (ME) свидетельствует о систематическом отклонении прогностических значений, а величина этой ошибки может оцениваться в сравнении со средним значением (AVER, табл. 3) и с климатологией интенсивности осадков в данном регионе. В табл. 3 приведены оценки по полям средних за пять месяцев верификации.

Таблица 3. Суммарные характеристики полей средних сумм осадков для синхронизованных радарных (OBS) и прогностических (SEQ) данных с заблаговременностью 10 мин

	min	q25	med	mean	q75	max	std
RAKU, Курск							
OBS	0.6	0.9	1.0	1.02	1.1	4.8	0.14
SEQ	0.6	0.8	0.9	0.96	1.1	1.9	0.17
RATL, Тула							
OBS	0.2	0.7	0.9	0.85	1.0	1.6	0.24
SEQ	0.3	0.7	0.8	0.81	0.9	1.5	0.18
RAVN, Внуково							
OBS	0.0	0.7	0.8	0.80	0.9	38.4	0.37
SEQ	0.3	0.7	0.7	0.74	0.8	1.1	0.14
RAVO, Воейково							
OBS	0.3	0.6	0.6	0.66	0.7	4.9	0.13
SEQ	0.4	0.6	0.6	0.64	0.7	1.0	0.06
RUDB, Брянск							
OBS	0.4	1.0	1.1	1.08	1.2	2.0	0.19
SEQ	0.5	0.9	1.0	1.03	1.1	1.8	0.15
RUDK, Кострома							
OBS	0.4	0.7	0.7	0.76	0.8	1.9	0.13
SEQ	0.5	0.7	0.7	0.72	0.8	1.1	0.08
RUDL, Смоленск							
OBS	0.6	0.8	0.8	0.84	0.9	1.4	0.08
SEQ	0.6	0.7	0.8	0.78	0.8	1.1	0.09
RUDN, Нижний Новгород							
OBS	0.0	0.7	0.7	0.71	0.8	2.7	0.17
SEQ	0.1	0.7	0.8	0.74	0.8	1.1	0.13
RUWJ, Валдай							
OBS	0.3	0.8	0.9	0.86	0.9	9.0	0.13
SEQ	0.6	0.7	0.8	0.82	0.9	1.2	0.11

Примечание. Красным цветом выделены значения для радаров, в которых были обнаружены сильно завышенные величины – «выбросы», зеленым –подозрительные минимальные значения.

Можно видеть вполне удовлетворительное сходство фактических и прогностических интегральных характеристик двух полей, за исключением случаев выбросов и подозрительных минимальных значений, что подтверждается количественно, если в качестве ориентира допустимой систематической ошибки взять первый квартиль наблюдений, который по всем радарам занимает интервал 0,6–1,0 мм/ч.

Однако распределение фактических осадков в таких пространственно-временных масштабах сильно асимметрично и сконцентрировано в узком диапазоне значений, как это видно и по табл. 3, потому понизим допустимую ошибку до 0,5 мм/ч. На рис. 3 поля средней ошибки при заблаговременности 10 мин состоят в основном из «допустимых» значений между -0,5 и +0,5 мм/ч.

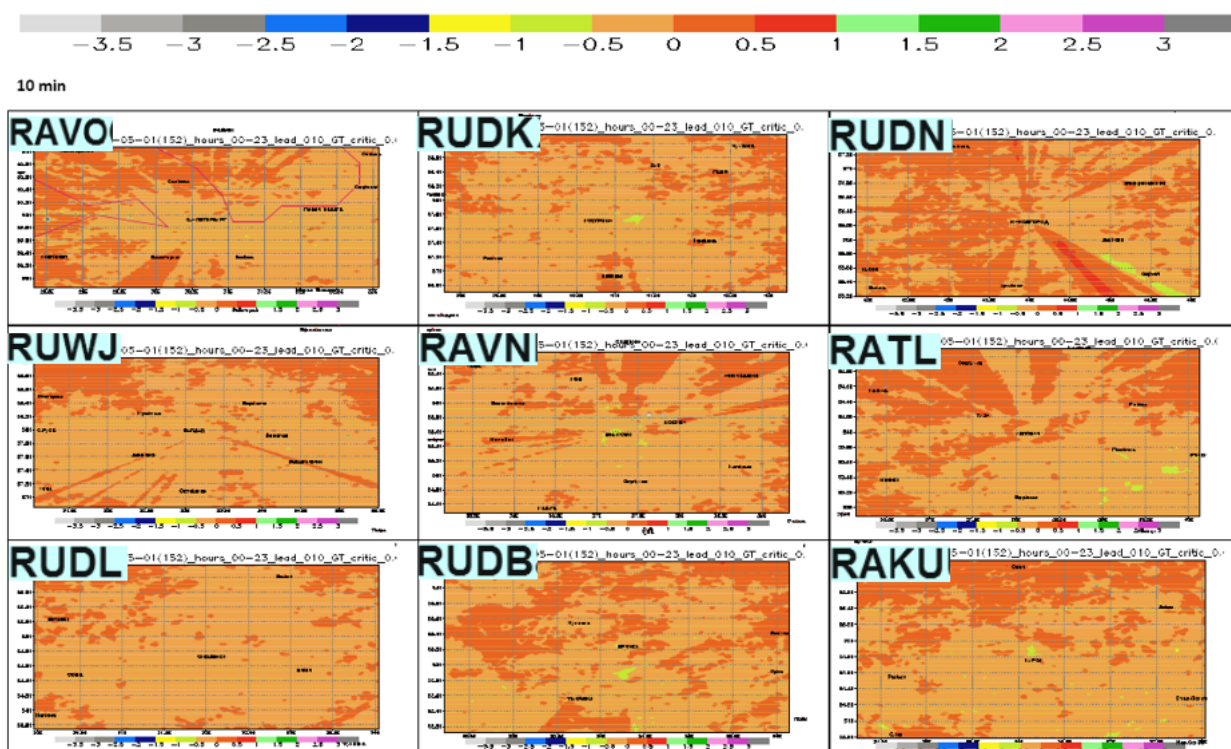


Рис. 3. Средняя ошибка прогностических осадков заблаговременности 10 мин за период 01.05 – 30.09.2017 для радаров на ЕТР. Единица измерения – [мм], градуировка палитры – [мм·6]. Оценка средней проводится по синхронизированным парам прогноз-наблюдение.

С ростом заблаговременности интенсивность прогностических осадков начинает систематически снижаться по отношению к факту, и к концу срока прогнозирования появляются обширные области значений за пределом -0,5 мм/ч (радары RAVN, RUDB, рис. 4).

Пространственное распределение связанных областей систематической ошибки одного знака может быть использовано как для статистической коррекции схемы STEPS, так и для адаптации параметров оптического потока, с помощью которого строится поле адвекции. На рис. 3 и 4 отчетливо обнаруживаются зоны влияния местников и очаги положительной, и

особенно отрицательной систематической ошибки. Области положительной ошибки (коричневый цвет, как правило, меньше 0,5 мм/ч) становятся более связными с ростом заблаговременности и так же, как и области отрицательных ошибок (между -1,0 и +0,5), формируются в определенной географической зоне (RAVN – к северо-западу от координат радара, RUDB – к юго-западу от координат радара). При этом отрицательные значения ME начинают массово появляться только для двух этих радаров примерно после полутора часов прогноза.

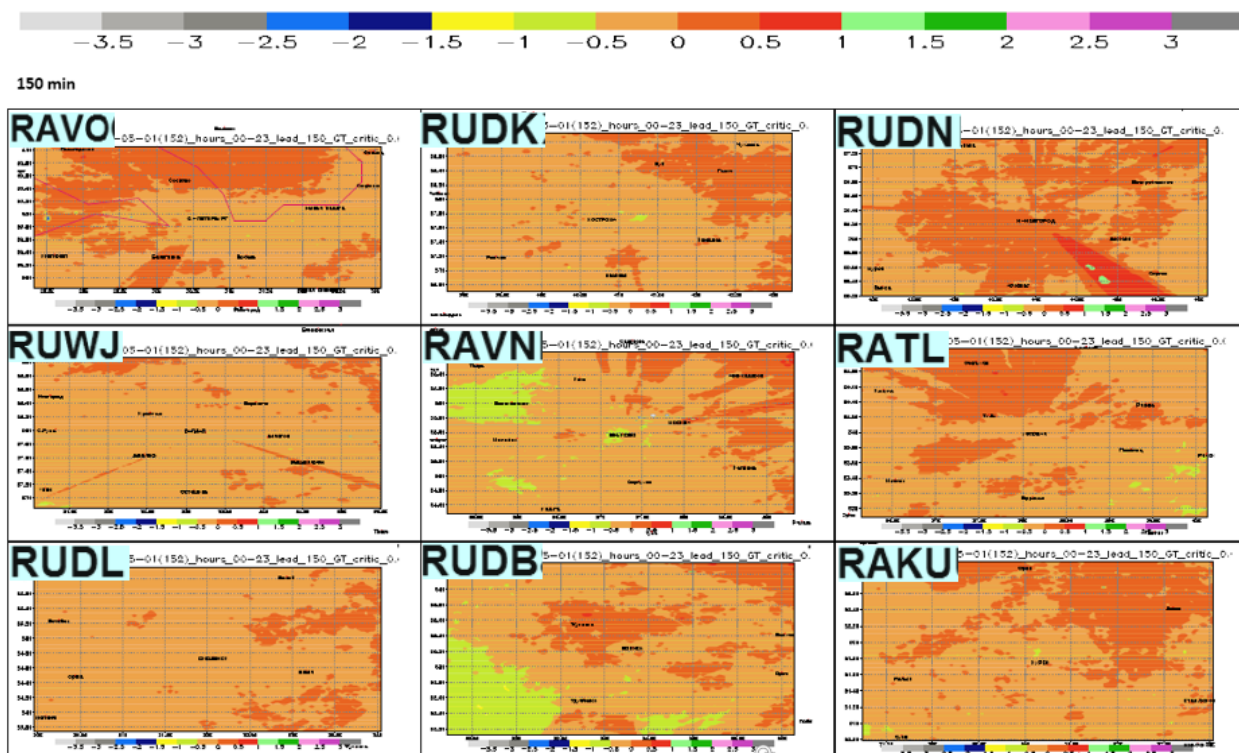


Рис. 4. Средняя ошибка прогностических осадков заблаговременности 150 мин за период 01.05 – 30.09.2017 для радаров на ЕТР. Единица измерения – [мм], градуировка палитры – [мм·6]. Оценка средней проводится по синхронизированным парам прогноз-наблюдения.

Коэффициент корреляции (COR) не является информативным показателем качества прогноза осадков, однако, как привычная и известная статистика, он используется для предварительной оценки качества и для оценки «практической предсказуемости». Так как ряды осадков в данной временной дискретности коррелированы, воспользуемся эвристическими оценками эффективного количества степеней свободы.

Полная длина временного ряда составляет немногим более 22000 сроков, при этом критический порог интенсивности (осадки менее 0,05 мм/ч не учитываются) сокращает полную выборку примерно до 10–15 %. Оценим объем промежуточной выборки в 2000–3000 значений, откуда, учитывая типичное время эволюции зон осадков примерно в 8 часов [1], получим наиболее осторожную оценку количества «независимых наблюдений» в 250 значе-

ний. Доверительные пределы 95%-ного двустороннего критерия для теоретической нулевой корреляции заключены в интервале 0,1–0,15 [2, табл. 4.5 в], который будем считать диапазоном критических значений COR.

На рис. 5 представлены поля показателя COR для заблаговременности 10 мин. Видно, что все поля залиты в основном цветами положительной корреляции со значениями от 0,10 до 0,80. Заметны такие пространственные особенности, как кольцевые структуры (RUDK, RAVN, RUDB, RUDL, RATL) и даже снижение корреляции при приближении к радару (RUDK).

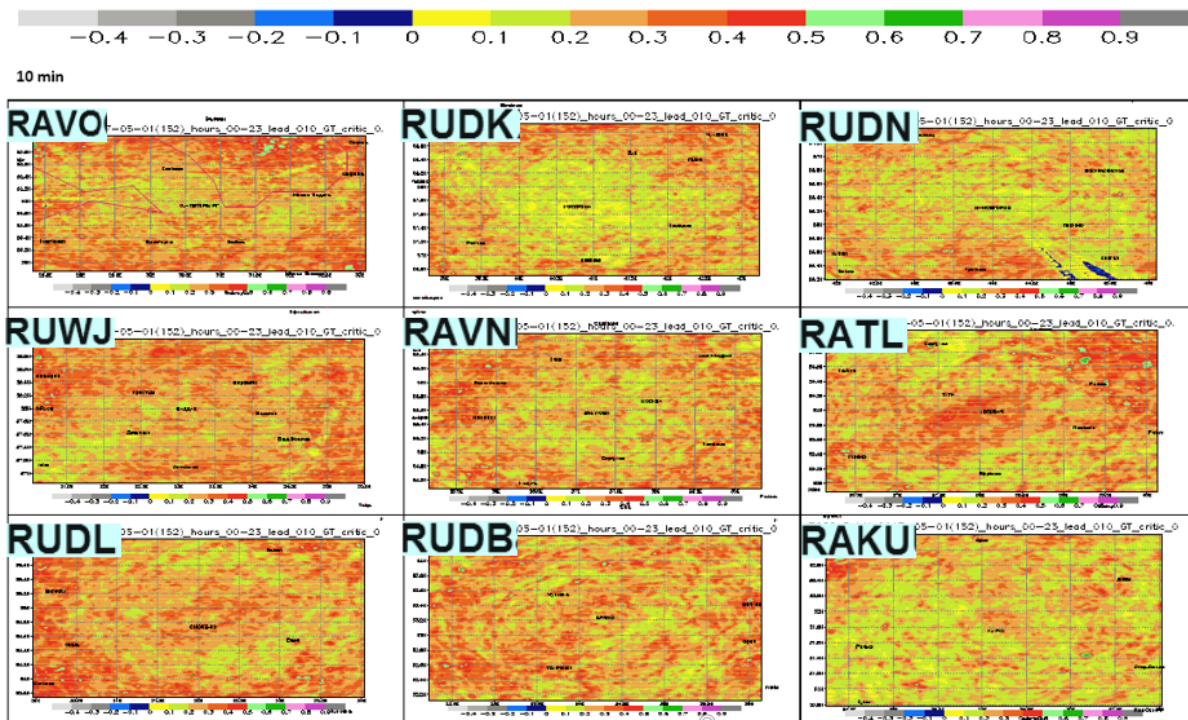


Рис. 5. Коэффициент корреляции прогностических осадков заблаговременности 10 мин за период 01.05 – 30.09.2017 для радаров на ЕТР.

Начиная с некоторой (разной для разных радаров) заблаговременности, значения COR становятся отрицательными, но не менее -0,1 (рис. 6). При этом увеличение областей отрицательных значений происходит в некоторых географически локализованных зонах. Как видно на рис. 6, области положительных и отрицательных значений для некоторых радаров оказываются связными, географически локализованными и могут быть использованы для коррекции результатов прогнозов схемы STEPS.

Табл. 4 дает представление о «потенциальной информативности» системы наукастинга в виде общих характеристик распределения показателя COR по полю. Зеленым цветом выделяются значения $COR \geq 0,1$, розовым цветом выделяются значения $COR \geq 0,15$. Столбцы квантилей (q25, med, q75) задают точную долю полной площади со значениями COR, превышающими заданный уровень.

Остальные статистические характеристики (min, mean, max, IQR, std) дают важные дополнительные сведения о распределении показателя по полю, например, индеквартильный размах показывает, в каком диапазоне значений показателя COR содержится половина всех точек поля.

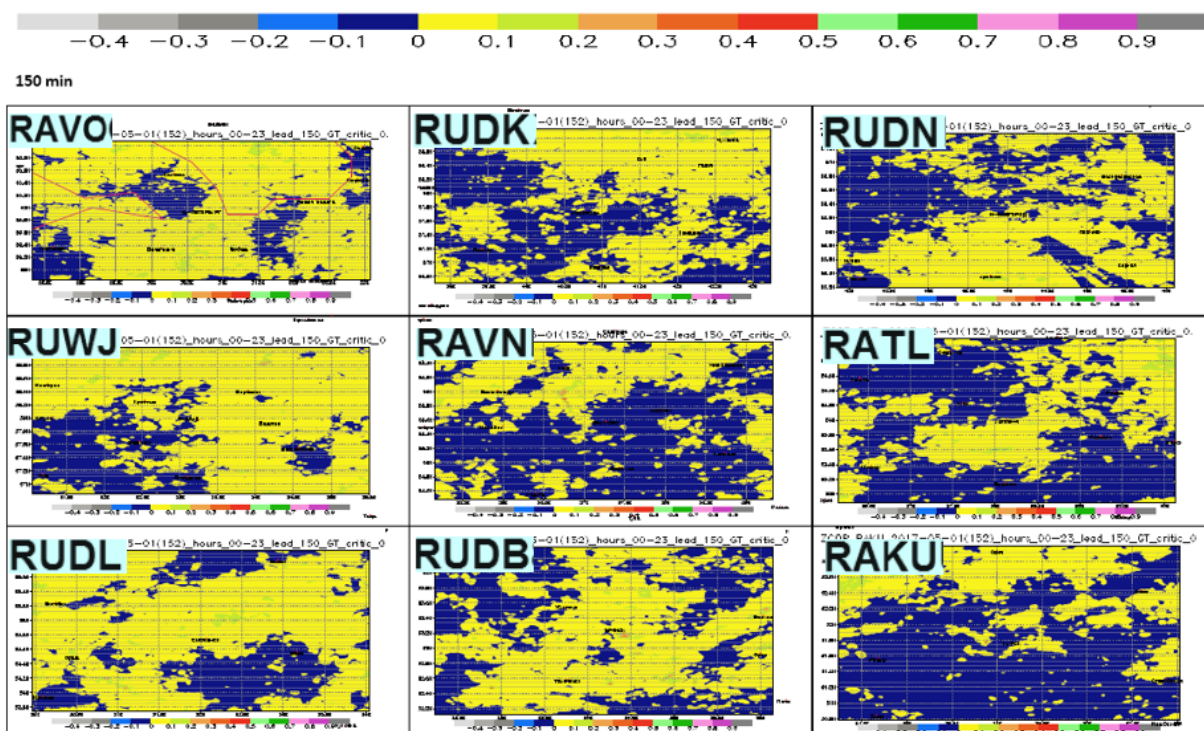


Рис. 6. Коэффициент корреляции прогностических осадков заблаговременности 150 мин за период 01.05 – 30.09.2017 для радаров на ЕТР.

Таблица 4. Суммарные характеристики полей коэффициента корреляции интенсивности осадков для синхронизированных радарных и прогностических данных с заблаговременностью 10 мин. COR в диапазоне 0,1 (зеленый) – 0.15 (розовый)

Радар	lead	min	q25	med	mean	q75	max	IQR	std
RAKU	010	-0.03	0.15	0.20	0.21	0.26	0.69	0.11	0.08
	020	-0.04	0.11	0.15	0.16	0.20	0.51	0.09	0.07
	030	-0.03	0.08	0.12	0.13	0.16	0.55	0.08	0.07
	040	-0.03	0.06	0.09	0.10	0.13	0.52	0.07	0.06
	050	-0.02	0.05	0.08	0.09	0.11	0.49	0.06	0.06
RATL	010	0.01	0.20	0.26	0.26	0.32	0.80	0.12	0.09
	020	0.00	0.15	0.20	0.21	0.26	0.87	0.11	0.08
	030	0.00	0.12	0.16	0.17	0.22	0.84	0.10	0.08
	040	-0.01	0.09	0.13	0.14	0.18	0.57	0.09	0.07
	050	-0.02	0.07	0.11	0.12	0.16	0.54	0.09	0.07
	060	-0.02	0.05	0.09	0.10	0.13	0.54	0.08	0.06
	070	-0.02	0.04	0.07	0.08	0.11	0.43	0.07	0.05
080	-0.02	0.03	0.06	0.07	0.10	0.52	0.07	0.05	
RAVN	010	0.00	0.20	0.25	0.26	0.31	0.75	0.11	0.08
	020	-0.02	0.15	0.20	0.21	0.25	0.70	0.10	0.07
	030	-0.01	0.12	0.16	0.17	0.21	0.51	0.09	0.07
	040	-0.01	0.10	0.14	0.14	0.18	0.53	0.08	0.06

	050	-0.01	0.08	0.11	0.12	0.15	0.53	0.07	0.06
	060	-0.03	0.06	0.09	0.10	0.13	0.44	0.07	0.05
	070	-0.03	0.05	0.07	0.08	0.11	0.45	0.06	0.05
RAVO	010	-0.02	0.22	0.28	0.28	0.34	0.79	0.12	0.09
	020	-0.02	0.17	0.22	0.23	0.28	0.69	0.11	0.08
	030	-0.01	0.14	0.19	0.19	0.24	0.54	0.10	0.07
	040	-0.02	0.12	0.16	0.16	0.20	0.70	0.08	0.07
	050	-0.01	0.10	0.14	0.14	0.18	0.54	0.08	0.06
	060	-0.02	0.08	0.12	0.12	0.16	0.40	0.08	0.05
	070	-0.02	0.07	0.10	0.11	0.14	0.52	0.07	0.05
	080	-0.02	0.06	0.09	0.09	0.12	0.52	0.06	0.05
	090	-0.02	0.05	0.07	0.08	0.11	0.46	0.06	0.05
	100	-0.02	0.04	0.06	0.07	0.10	0.52	0.06	0.04
RUDB	010	0.01	0.20	0.25	0.26	0.31	0.71	0.11	0.09
	020	0.01	0.15	0.20	0.20	0.25	0.66	0.10	0.08
	030	0.00	0.12	0.16	0.17	0.21	0.62	0.09	0.07
	040	-0.01	0.10	0.13	0.14	0.18	0.75	0.08	0.06
	050	-0.01	0.08	0.11	0.12	0.15	0.75	0.07	0.06
	060	-0.01	0.06	0.09	0.10	0.13	0.60	0.07	0.05
	070	-0.02	0.05	0.08	0.08	0.11	0.40	0.06	0.05
RUDK	010	0.00	0.16	0.22	0.22	0.28	0.80	0.12	0.09
	020	-0.01	0.12	0.17	0.18	0.23	0.66	0.11	0.08
	030	0.00	0.10	0.14	0.15	0.19	0.50	0.09	0.07
	040	-0.01	0.08	0.12	0.12	0.16	0.58	0.08	0.06
	050	-0.01	0.06	0.10	0.10	0.14	0.49	0.08	0.05
	060	-0.01	0.05	0.08	0.09	0.12	0.38	0.07	0.05
	070	-0.01	0.04	0.07	0.07	0.10	0.37	0.06	0.04
RUDL	010	0.01	0.21	0.26	0.27	0.32	0.64	0.11	0.08
	020	0.02	0.17	0.22	0.22	0.27	0.55	0.10	0.07
	030	0.02	0.14	0.18	0.19	0.23	0.58	0.09	0.07
	040	0.01	0.11	0.15	0.16	0.20	0.65	0.09	0.06
	050	0.00	0.09	0.13	0.14	0.17	0.45	0.08	0.06
	060	0.00	0.07	0.11	0.12	0.15	0.38	0.08	0.05
	070	0.00	0.06	0.09	0.10	0.13	0.39	0.07	0.05
	080	-0.01	0.05	0.08	0.09	0.12	0.35	0.07	0.05
	090	-0.02	0.04	0.07	0.08	0.10	0.39	0.06	0.05
RUDN	010	-0.15	0.16	0.21	0.22	0.27	0.70	0.11	0.08
	020	-0.11	0.13	0.17	0.17	0.22	0.59	0.09	0.07
	030	-0.11	0.10	0.14	0.14	0.18	0.52	0.08	0.06
	040	-0.09	0.08	0.12	0.12	0.15	0.54	0.07	0.05
	050	-0.10	0.07	0.10	0.10	0.13	0.44	0.06	0.05
	060	-0.10	0.06	0.08	0.09	0.11	0.39	0.05	0.05
	070	-0.10	0.04	0.07	0.07	0.10	0.53	0.06	0.04
RUWJ	010	0.00	0.22	0.27	0.27	0.32	0.63	0.10	0.08
	020	0.00	0.18	0.22	0.22	0.26	0.56	0.08	0.06
	030	-0.01	0.15	0.19	0.19	0.23	0.48	0.08	0.06
	040	-0.01	0.13	0.16	0.16	0.20	0.49	0.07	0.05
	050	-0.01	0.11	0.14	0.14	0.17	0.42	0.06	0.05
	060	-0.01	0.09	0.12	0.12	0.15	0.39	0.06	0.05
	070	-0.01	0.07	0.10	0.11	0.13	0.45	0.06	0.04
	080	-0.01	0.06	0.09	0.09	0.11	0.42	0.05	0.04
	090	0.00	0.05	0.07	0.08	0.10	0.44	0.05	0.04

Учитывая заблаговременности, получим оценки потенциальной предсказуемости системы наукастинга по показателю COR в долях общей площади, содержащей данный уровень значимой корреляции (табл. 5). Как видно в табл. 5, потенциальная предсказуемость для разных радаров и для площадей не менее четверти от общей площади верификации оказывается довольно разнообразной (от 10 до 100 минут). Полученные результаты в общем подтверждают выводы метеослужбы Великобритании о том, что метод статистической экстраполяции оказывается полезным для прогноза осадков в летний период лишь на интервале до 1–2 часов (<https://www.metoffice.gov.uk/learning/making-a-forecast/hours-ahead/nowcasting>).

Таблица 5. Предел информативного прогноза системы наукастинга (в десятках минут) и для заданной доли площади (в процентах) по показателю COR

Радар	Критический уровень показателя COR					
	0.10			0.15		
	Доля площади, занимаемой значениями COR не ниже критического уровня					
	75%	50%	25%	75%	50%	25%
RAKU	20	30	50	10	20	30
RATL	30	50	80	20	30	50
RAVN	40	50	70	20	30	50
RAVO	50	70	100	20	40	60
RUDB	40	50	70	20	30	40
RUDK	30	50	70	10	20	40
RUDL	40	60	90	20	40	60
RUDN	30	50	70	10	20	30
RUWJ	50	70	90	30	40	60

2.3. Категоризованные показатели качества

В данном разделе приведены результаты оценок качества с помощью показателей PSS (критерий Пирса-Обухова) и EDI (индекс экстремальной зависимости) для градации осадков не менее 4 мм/ч. Такая градация с вложенными в нее более сильными интенсивностями оказалась статистически наиболее обеспеченной для имеющегося архива данных верификации.

С помощью оценки доверительных интервалов для характеристик таблицы сопряженности (например, [11]) и некоторых эвристических соображений, примененных к таблицам сопряженностей для порога 4 мм/ч, в качестве критических уровней ненулевых значений взяты PSS = 0,1 и EDI = 0,3. В табл. 6 собраны оценки информативного предела предсказуемости для этих двух показателей. Как видно, на основе показателя PSS прогнозы категории ≥ 4 мм/ч с качеством не менее 0,1 и по 75 % площади оказываются полезными при заблаго-

временностях от 20 до 70 мин, по 50 % площади – от 40 до 90 мин, а по 25 % площади – от 80 до 120 мин.

Следует подчеркнуть, что данная граница, как и в случае показателя COR, является нижней и по выделенной территории имеются зоны с более высокими показателями качества. Если использовать показатель EDI, то оценка интервала полезного прогноза окажется ниже, что делает данный показатель более строгим по сравнению с PSS: интервалы полезного прогноза составляют, соответственно, 20–50, 30–70 и 60–90 мин по площадям 75, 50 и 25 % от общей площади области верификации вокруг отдельного радара.

Таблица 6. Предел информативного прогноза системы наукастинга (в десятках минут) и для заданной доли площади (в процентах) по показателю PSS и EDI для порога 4 мм/ч

Радар	Критический уровень показателя COR					
	0.10			0.15		
	Доля площади, занимаемой значениями COR не ниже критического уровня					
	75%	50%	25%	75%	50%	25%
RAKU	20	30	50	10	20	30
RATL	30	50	80	20	30	50
RAVN	40	50	70	20	30	50
RAVO	50	70	100	20	40	60
RUDB	40	50	70	20	30	40
RUDK	30	50	70	10	20	40
RUDL	40	60	90	20	40	60
RUDN	30	50	70	10	20	30
RUWJ	50	70	90	30	40	60

Из расчетов видно, что статистически обеспеченной оказывается категория ≥ 4 мм/ч, а более высокие пороги, прогноз превышения которых имеет особое значение для предупреждений об опасных явлениях, таковыми не являются. Как известно, показатель Пирса-Обухова при уменьшающейся повторяемости явления стремится к доле попаданий (H), в то время как индекс экстремальной зависимости при довольно общих предположениях стабилизируется на некотором ненулевом уровне [6]. При недостаточных объемах выборок в таблицах сопряженностей для высоких порогов (например, 8 и 12 мм/ч) возникают вырожденные (нулевые) ячейки, отчего PSS стремится к H, а EDI становится невычислимым. Вышеупомянутые эффекты и дефекты связаны со строгостью и ограниченностью точечной верификации и могут быть преодолены с помощью методов пространственной верификации, позволяющих выделять пространственные масштабы сетки, для которых прогноз может считаться наиболее полезным. Для этих целей рекомендуется, например, показатель окрестной

верификации FSS (fractions skill score), который можно назвать «критерием пространственных долей» и который является обобщением известного критерия Брайера в вероятностных прогнозах [8].

2.4. Выводы по результатам точечной верификации наукастинга осадков

Проведенные точечные оценки позволяют сделать несколько выводов.

Во-первых, существует проблема качества радиолокационных данных, особенно из-за наличия местников, критически влияющих на точечные оценки. Однако валидация этих данных с помощью стационарных наблюдений в сопоставимых пространственно-временных масштабах в настоящее время затруднительна из-за дефицита таких наблюдений.

Во-вторых, оцененная информативность прогнозов для большинства локаторов составляет в среднем около одного часа или чуть больше, при этом статистически значимые характеристики качества относятся к интенсивностям осадков не выше, чем ≥ 4 мм/ч. Для оценок качества прогнозов экстремальных значений, например выше 8 или 12 мм/ч, требуются другие объемы выборок и иные методы верификации.

Наконец, в-третьих, некоторые обнаруженные недостатки прогнозов носят систематический характер и могут быть устранены методами статистической коррекции.

3. Пространственная верификация

Современные методы пространственной верификации были разработаны для преодоления так называемого «двойного штрафа» (double penalty), к которому приводили стандартные оценки качества не очень точных, но полезных прогнозов пространственных объектов («типов», «элементов», «особенностей») «за наблюденное, но не предсказанное, и за предсказанное, но не наблюденное» [10, гл. 6]. Несправедливость двойного наказания стала особенно заметной при увеличении пространственного разрешения в численных моделях, когда более грубая модель, не способная предсказывать «объект» внутри ячейки своей сетки, штрафовалась лишь единожды – «за наблюденное, но не предсказанное».

В данной статье представлены результаты применения программного комплекса SpatialVx, разработанного Э. Гиллеландом (США) и пока еще находящегося в стадии тестирования (<https://cran.r-project.org/web/packages/SpatialVx/SpatialVx.pdf>). Здесь использованы те модули комплекса, которые достаточно просты и уже проверены заинтересованным сообществом исследователей, в частности «объектно-ориентированный» модуль SpatialVx.craeg, уже апробированный в нескольких системах верификации, например в METMODE (NCAR RAL, США) и в CRA ([9], Австралия).

Подчеркнем, что ввиду экспериментальности комплекса SpatialVx и недостаточной практики работы с многочисленными настроечными параметрами комплекса, представленные результаты пространственной верификации являются предварительными.

Вначале определяются ключевые параметры настройки комплекса SpatialVx. Для выделения «объектов» задается порог интенсивности, который очерчивает области достаточной связности (желательно с небольшим количеством внутренних дыр). Так как в мелкой сетке радарного поля области осадков представляют собой образования чрезвычайной пространственной изменчивости с фрактальными границами, то для выделения разумных границ требуется дополнительная процедура сглаживания. Сглаживание производится «параметром конволюции», равным количеству точек сетки, составляющих радиус осреднения. В полях осадков существует, как правило, множество мелких связных областей, автоматически идентифицируемых как «объекты верификации», но сильно затрудняющих и расчеты, и интерпретацию результатов. Чтобы избежать чрезмерного обилия объектов, вводятся параметры, ограничивающие количество внутренних точек выделяемой области связности. Здесь заданы следующие параметры: порог – 1 мм/ч, радиус конволюции – 9 точек (эквивалент 18 км), минимальный размер – 1225 точек (эквивалент квадрата 35×35 или 70×70 км). Иногда полезно задать максимальный размер, например в четверть общей области.

После идентификации «объектов» в поле наблюдения и в поле прогноза производится их «спаривание» и рассчитываются следующие статистические характеристики: координаты горизонтального сдвига по x и y (x_shift , y_shift), полный средний квадрат ошибки (MSE.total) и его разложения на составляющие по сдвигу (MSE.shift), расположению (MSE.displacement), объему (MSE.volume) и форме (MSE.pattern). Точные определения этих характеристик даны в статье [9].

Ниже рассмотрим в основном характеристики сдвига, означающего такое перемещение прогностического объекта (как твердого плоского тела) в сторону наблюдаемого объекта (с возможным вращением), которое минимизирует некоторый функционал качества совмещения (как правило, сумму квадратов разностей).

Перемещение производится по вектору между «центрами тяжести» двух объектов (центроидами), поэтому значения смещений по долготе и широте имеют вещественный вид большей точности, чем целые единицы размерности сетки. А так как вращение сопоставляет главные оси приближаемых эллипсов, то суммарный квадрат ошибки после смещения может вырасти, делая знак MSE.displacement отрицательным и тем самым отчасти нарушая общую оптимальность смещения в угоду лучшего совпадения форм.

Для определения «допустимых ошибок» в горизонтальном сдвиге приходится также прибегать к некоторой эвристике. Воспользуемся для этого площадью пересечения двух

объектов: чем меньше эта площадь, тем больше ошибка. Представив объекты в виде кругов или квадратов, можно оценить критическое пересечение некоторой линейной мерой смещения, например, совпадающей с типичным размером объекта. Тогда при минимальном размере объекта в 70×70 км критическим уровнем ошибки окажется столько единиц смещения по отдельным осям, корень квадратный из суммы квадратов которых окажется равным примерно 35 единицам.

Рассмотрим результаты анализа одной ситуации (case study) и предложим метод суммарной оценки качества прогноза объектов по набору ситуаций и по непрерывному периоду времени.

3.1. Анализ отдельного случая

Ураган 29 мая 2017 года в Москве предоставил богатый материал для анализа как развивающихся процессов, так и полученных полей наукастинга осадков, хотя ключевым метеорологическим параметром в этот день был порывистый ветер с рекордными скоростями.

На рис. 7 демонстрируются поля интенсивности осадков по наблюдениям радара Внуково (RAVN) начиная с 15:40 (а, в) и по результатам прогноза схемой STEPS на сроки 10 и 40 мин (б, г). В нижней части рисунка прилагается результат идентификации и спаривания объектов, полученный программой SpatialVx (д).

Прежде всего заметно, что прогностические поля более сглажены благодаря пространственной фильтрации в схеме STEPS. Затем по радарным полям можно оценить, что в течение 40 мин погодная система перемещается на восток, примерно на 50 км, в то время как прогностическое поле смещается в том же направлении, но на меньшее расстояние. Наконец, заметно различие в отдельных областях эволюции интенсивности осадков. Так, в наблюдениях уже в начале прогностического срока севернее Клина вплоть до Твери формируется полоса сильных осадков, примерно через полчаса идентифицируемая пакетом SpatialVx как новый объект (д), но который никакая статистическая интерполяция воспроизвести не может. Хорошо также видно, насколько объекты, выделяемые SpatialVx, схематичнее и грубее соответствующих областей в радарных и прогностических полях.

В табл. 7 приводятся соответствующие объектно-ориентированные оценки качества для всех заблаговременностей (ilead). Повтор заблаговременности означает наличие дополнительной пары спаренных объектов. Если исключить вариант ложного согласования объектов на первых 10 минутах (сдвиги -39.30 и -55.22), то по сдвигам можно считать вполне удовлетворительным прогнозирование выделенных объектов сроком до 50 минут. Далее начинает расти ошибка положения по долготе (x_shift), полный средний квадрат ошибки

(MSE.total), ошибки по объему и форме (MSE.volume, MSE.pattern). При этом систематически снижается ошибка по широте (y_shift).

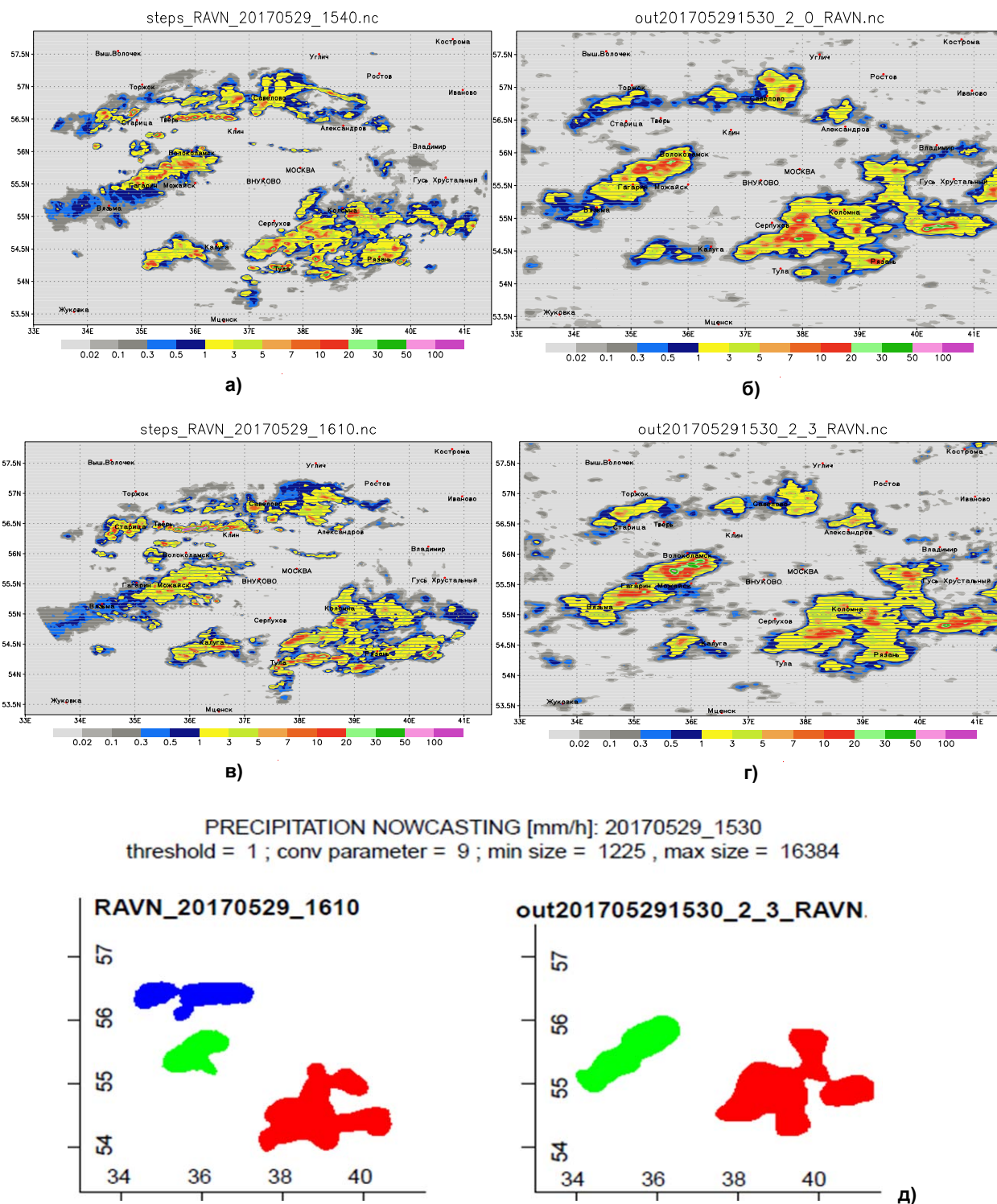


Рис. 7. Поля осадков по радару RAVN (Внуково) за сроки 2017.05.29_15.40 и 16.10 (а, в), синхронизированные поля наукастинга с помощью схемы STEPS на 10 и 40 мин (б, г) и выделенные пакетом SpatialVx «объекты» в соответствующих полях за 16:10 и 40 мин заблаговременности (д). Границы объектов проведены на основе изолинии 1 мм/ч, радиус пространственного осреднения равен 9 единиц сетки, минимальный размер объектов равен 35×35 точек. Одинаковым цветом обозначены пары спаренных полей, по которым рассчитываются характеристики объектно-ориентированной верификации.

Таблица 7. Результаты применения пакета SpatialVx для объектно-ориентированной верификации наукастинга 2017.05.29_15.30 на 2,5 часа по области обзора радара RAVN (Внуково)

ilead	x_shift	y_shift	MSE.total	MSE.shift	MSE.displ	MSE.vol	MSE.pattn
1	12.51	17.39	3.0968	2.8209	0.2759	0.0072	2.8137
1	-39.30	-55.22	1.1544	0.8879	0.2665	0.0008	0.8872
2	2.58	-5.63	6.3732	6.5008	-0.1277	0.0184	6.4824
3	14.96	23.63	2.4008	1.9987	0.4021	0.0078	1.9909
4	15.39	22.79	2.2373	1.9819	0.2554	0.0090	1.9729
4	-9.78	-30.76	9.8393	9.2537	0.5857	0.0001	9.2536
5	21.99	-15.58	10.3552	10.9114	-0.5562	0.0172	10.8942
6	45.85	-27.76	11.1895	11.5672	-0.3776	0.0440	11.5232
7	41.48	-22.83	9.9160	9.7379	0.1781	0.0779	9.6600
8	69.05	-36.51	8.2263	7.7454	0.4809	0.1448	7.6006
9	76.12	-30.70	8.1989	7.0923	1.1066	0.1608	6.9315
10	73.31	-18.60	8.6644	7.6121	1.0524	0.1277	7.4844
11	76.14	-15.63	8.7054	10.9510	-2.2457	0.2273	10.7237
12	77.82	-15.09	8.9470	25.9090	-16.9620	0.5888	25.3202
13	79.11	-11.81	8.2814	14.8719	-6.5905	0.3390	14.5329
14	78.64	8.95	8.1216	14.3965	-6.2749	0.3734	14.0231
15	100.43	1.24	8.5237	19.6665	-11.1428	0.7572	18.9093

Примечание. Обозначения, приведенные в таблице: ilead – заблаговременность (десять минут), совпадающие значения относятся к разным парам объектов; x_shift, y_shift – сдвиг по долготам и широтам, MSE.total – полный средний квадрат ошибки, MSE.shift – составляющая по сдвигу, MSE.displacement составляющая по расположению, MSE.volume – составляющая по объему, MSE.pattern – составляющая по форме. Сдвиги – в единицах сетки (1 ед=2 км), квадрат ошибки и составляющие – в [мм/ч]².

3.2. Суммарный анализ смещения прогностических объектов по наборам выделенных ситуаций

Суммарные оценки результатов объектно-ориентированной верификации проведены по 166 ситуациям с большими областями интенсивных осадков за период май-июль 2017 года. Такие оценки, аналогичные одноименным статистикам точечной верификации, дают представление о количестве пар соответствующих объектов, удовлетворяющих тем или иным диапазонам значений критерия качества. Напомним, критерием качества служит эвристическое определение полезного прогноза через линейную меру смещения (п. 3.1).

Для экономии места ограничим заблаговременность одним часом. По значениям характеристик табл. 8 и 9 можно сделать несколько содержательных выводов, относящихся явно к качеству наукастинга с помощью схемы STEPS, и неявно – к особенностям тестового пакета SpatialVx при спаривании объектов и расчете ошибок расположения.

Таблица 8. Суммарные характеристики сдвига по долготе объектов (x_shift), выделенных с помощью SpatialVx. В скобках около индексов радаров указано количество прогнозов внутри отмеченных ситуаций. Суммарные характеристики описаны в разделе 2

Радар	ilead	min	q25	med	mean	q75	max
RAKU(14)	1	-15.280	-7.620	-2.680	-0.609	3.990	16.730
	2	-23.480	-9.408	-2.505	-1.519	5.140	18.240
	3	-25.920	-9.505	-5.345	-3.125	0.588	30.640
	4	-33.920	-9.970	-0.940	-0.467	6.923	32.660
	5	-50.030	-17.730	-5.530	-6.011	7.145	32.350
	6	-43.530	-19.230	-4.490	-1.933	18.115	30.640
RATL(16)	1	-11.900	-0.790	1.690	1.320	4.795	9.670
	2	-13.140	-1.395	2.560	4.016	9.245	35.600
	3	-19.340	-3.713	0.290	0.387	7.072	10.800
	4	-20.900	-11.015	-0.040	-2.928	4.312	11.060
	5	-32.280	-14.027	-0.960	-2.524	9.157	20.550
	6	-46.520	-14.072	-1.040	-3.085	7.465	23.910
RAVN(20)	1	-17.790	-5.652	-1.890	-1.479	2.720	16.970
	2	-20.260	-6.620	-2.235	-0.933	2.623	36.950
	3	-21.870	-3.623	-1.165	0.418	7.462	30.540
	4	-32.460	-8.592	-0.845	-2.917	1.445	29.590
	5	-32.050	-10.977	-2.200	-1.934	7.008	29.330
	6	-38.140	-21.660	-5.350	-5.637	6.595	27.340
RAVO(13)	1	-16.230	-8.510	-3.230	-3.863	0.290	6.600
	2	-20.160	-4.500	-2.490	-2.858	1.410	8.300
	3	-26.980	-5.000	-3.770	-3.551	1.020	8.980
	4	-27.310	-8.250	-6.030	-4.469	1.550	9.420
	5	-36.330	-10.350	-6.790	-8.233	3.620	7.390
	6	-57.870	-10.090	-6.820	-5.068	5.060	46.940
RUDB(23)	1	-13.400	-2.223	4.645	6.532	13.878	29.350
	2	-15.450	-5.940	5.090	7.085	17.490	38.960
	3	-15.970	-4.567	4.255	6.739	19.137	31.860
	4	-16.020	-5.380	5.990	5.894	18.810	33.410
	5	-17.370	-1.450	9.115	8.298	19.590	30.600
	6	-17.500	-4.950	8.595	7.341	17.848	34.060
RUDK(19)	1	-29.870	-1.130	0.470	2.206	9.217	39.390
	2	-34.580	-2.530	2.465	1.197	10.520	23.170
	3	-23.870	-2.915	3.055	3.016	11.697	25.670
	4	-26.530	-4.120	4.165	2.662	11.652	31.410
	5	-23.920	-3.980	3.290	2.348	10.010	35.720
	6	-31.950	-0.570	4.090	4.164	11.400	37.150
RUDL(18)	1	-25.320	-11.235	0.845	-1.585	7.787	14.130
	2	-26.220	-10.102	1.460	-0.729	8.322	19.670
	3	-16.860	-2.215	0.720	4.290	12.235	38.430
	4	-17.280	-4.335	0.485	4.185	12.410	38.870
	5	-20.200	-5.190	-2.300	1.548	11.367	32.300
	6	-24.860	-7.555	-4.195	-0.507	10.568	29.750
RUDN(19)	1	-23.370	-10.170	2.160	-0.535	8.410	14.470
	2	-21.800	-10.723	-0.825	0.095	10.163	32.090
	3	-19.700	-9.580	-1.820	-0.821	4.950	24.320
	4	-18.430	-10.280	4.390	3.066	9.830	57.310
	5	-22.580	-5.842	2.985	4.917	11.332	58.510
	6	-35.680	-6.595	3.915	6.768	21.810	64.090

RUWJ(24)	1	-13.950	-4.720	-0.500	0.969	4.930	22.880
	2	-17.220	-8.370	-0.900	0.908	5.590	28.970
	3	-22.360	-9.760	0.220	2.218	7.720	47.030
	4	-23.380	-6.660	-3.480	1.182	6.220	51.890
	5	-25.530	-9.330	-2.205	0.019	6.555	35.580
	6	-32.770	-13.308	-3.940	-0.658	10.255	37.960

Таблица 9. Суммарные характеристики сдвига по долготе объектов (y_shift), выделенных с помощью SpatialVx. В скобках около индексов радаров указано количество прогнозов внутри отмеченных ситуаций. Суммарные характеристики описаны в разделе 2

Радар	ilead	min	q25	med	mean	q75	max
RAKU(14)	1	-11.660	-5.530	1.090	2.127	10.910	18.650
	2	-8.280	-2.113	0.420	4.237	7.397	24.520
	3	-17.700	-3.618	0.555	4.241	13.570	27.110
	4	-22.410	-5.715	-0.300	1.494	6.180	23.810
	5	-26.740	-4.260	4.980	5.939	17.657	34.460
	6	-29.950	-0.180	7.200	7.491	17.800	39.580
RATL(16)	1	-8.780	-1.715	2.740	3.173	8.640	15.450
	2	-9.540	-1.475	3.920	3.065	8.700	12.590
	3	-12.460	-1.560	6.260	3.842	9.013	18.590
	4	-14.470	-3.268	8.210	5.179	13.540	17.750
	5	-14.980	-1.228	9.575	6.199	13.728	29.200
	6	-17.380	0.072	6.195	5.195	11.762	29.570
RAVN(20)	1	-21.640	-0.263	4.430	5.831	8.375	31.480
	2	-22.230	-0.557	5.520	6.826	9.737	37.370
	3	-19.750	-1.875	4.215	7.121	13.367	47.800
	4	-17.600	-2.608	3.360	7.212	12.335	54.510
	5	-19.580	-1.625	3.390	8.736	22.145	55.360
	6	-30.470	-3.508	4.555	7.888	19.242	55.900
RAVO(13)	1	-11.820	-5.210	-2.120	-0.921	3.450	12.930
	2	-11.460	-3.610	-3.610	-1.014	3.090	19.600
	3	-15.280	-8.430	-3.490	-0.217	5.860	15.320
	4	-16.190	-6.290	-0.570	0.502	5.410	20.150
	5	-16.450	-5.960	-3.700	0.072	5.840	27.780
	6	-37.850	-4.170	1.940	1.053	4.560	36.760
RUDB(23)	1	-34.540	2.295	8.065	7.355	14.660	28.280
	2	-43.050	5.080	9.560	8.557	14.600	35.420
	3	-35.230	5.088	9.305	9.914	15.150	40.190
	4	-8.440	4.080	10.730	12.216	18.300	39.480
	5	-39.890	4.095	10.580	11.185	18.502	44.650
	6	-12.180	6.460	9.700	13.438	19.810	50.660
RUDK(19)	1	-25.310	-3.333	2.260	6.082	13.647	58.160
	2	-23.690	-0.045	4.975	6.619	14.295	66.490
	3	-53.010	-0.363	1.770	5.979	15.488	65.290
	4	-48.700	-2.853	3.550	5.580	13.730	59.030
	5	-50.930	-1.200	3.340	4.821	15.180	59.310
	6	-57.940	-0.930	2.920	6.497	23.410	60.940
RUDL(18)	1	-75.280	-2.917	4.795	-0.279	11.938	29.360
	2	-63.560	-1.965	9.075	1.560	14.288	17.790
	3	-76.250	-0.105	10.490	4.770	16.455	45.000
	4	-63.290	-5.003	10.810	4.438	16.305	47.330
	5	-22.370	-2.522	12.165	9.516	17.843	42.200
	6	-49.310	-7.750	13.040	3.865	19.515	33.900

RUDN(19)	1	-20.580	-5.535	-0.525	-0.689	6.450	22.150
	2	-20.160	-4.173	1.565	3.289	10.640	30.000
	3	-24.740	-2.320	0.290	4.072	13.940	31.980
	4	-16.890	-3.670	-0.120	2.678	8.860	32.770
	5	-18.760	-2.735	2.160	3.586	11.630	30.920
	6	-37.300	-12.465	-0.005	0.265	11.710	48.870
RUWJ(24)	1	-36.750	1.240	3.610	5.100	11.250	25.510
	2	-40.050	0.140	4.590	6.656	14.470	29.970
	3	-38.360	0.730	8.900	9.473	22.140	35.090
	4	-17.510	0.420	10.320	9.816	16.120	40.860
	5	-18.860	-1.010	9.095	9.946	15.887	49.760
	6	-21.160	-1.365	7.620	9.726	16.887	55.990

Во-первых, по знакам и величинам медианы и средней можно судить о симметричности или асимметричности распределения и о преимущественном знаке соответствующего сдвига, характеризующем систематику прогноза объектов данного масштаба. Симметрия дополнительно подтверждается значениями экстремумов и двух квартилей. Так, например, для радара RAKU (Курск) систематический сдвиг по широте (y_shift) в основном положителен и составляет величину порядка 10 км (на север), а по долготе (x_shift) – в основном отрицателен и составляет величину порядка 5 км (на запад). Сдвиг на север характерен для всех радаров, если судить по значениям и знакам средней ($mean$). Сдвиг по широте более разнообразен и иногда меняет знак с ростом заблаговременности, как, например, в случае RATL (Тула) и RUDL (Смоленск).

Во-вторых, экстремальные значения (min и max) свидетельствуют о максимальных ошибках, которые на часовом прогностическом интервале могут достигать 100 и более километров. Однако многие из таких ошибок вызваны особенностями пакета SpatialVx в указании пар соответствующих объектов, как это имело место при анализе случая урагана в Москве 29 мая 2017 года. Иногда ошибки порождаются геометрическими свойствами объектов, например, большой протяженностью или сильной искривленностью, которые, как отмечалось выше, затрудняют оптимальное смещение прогностического объекта со снижением среднего квадрата ошибки ($MSE.shift$). Очевидно, такие случаи необходимо выделять и анализировать на основе последовательных карт.

В-третьих, значения почти всех квартилей таковы, что результирующее смещение не превышает 35 единиц, т. е. удовлетворяет выбранному выше критерию информативного прогноза объектов. А это значит, что не менее половины объектов установленного размера (не менее 35×35 точек сетки) прогнозируются в течение часа (на самом деле – до полутора часов) без потери пересечения, если предполагать формы объектов в основном выпуклыми и обладающими в приближении эллипсами с небольшим эксцентриситетом. Впрочем, именно такое свойство объектов учитывалась при визуальном отборе ситуаций.

3.3. Суммарный анализ смещения прогностических объектов по непрерывному периоду времени

Небольшое количество предварительных программных условий и соответствующее определение настроечных параметров SpatialVx позволяют организовать расчет оценок пространственной верификации в потоке по любому периоду составления прогнозов без выделения особых ситуаций. Очевидно, в таком случае оценки будут относиться к периоду времени, а не к конкретным погодным процессам.

Рассмотрим в этой связи ситуацию с ураганом 29 мая и приведем результаты анализа всех прогнозов между 14.00 и 17.50 ч ВСВ. В этом интервале были составлены последовательно 20 прогнозов на 2,5 часа с 10-минутной дискретностью. Некоторые сроки были пропущены из-за проблем с поступлением начальных данных. На разных заблаговременностях пакетом SpatialVx выделены от 20 до 25 пар объектов, для которых рассчитываются сдвиги (x_shift , y_shift) и квадраты ошибок (MSE.*). По наборам сдвигов рассчитаны суммарные характеристики, которые представлены в табл. 10.

Таблица 10. Суммарные характеристики сдвигов объектов при прогнозировании полей осадков по данным радара RAVN (Внуково) 29 мая 2017 г. за период времени 14.00–17.50 ч ВСВ

ilead	min	q25	med	mean	q75	max
x_shift						
1	-39.300	3.995	15.710	15.891	22.760	63.820
2	-15.100	2.655	14.340	20.760	35.483	76.830
3	-15.830	3.920	14.790	20.436	28.998	96.520
4	-19.350	-0.630	15.390	19.764	29.590	97.720
5	-18.650	-1.660	23.230	24.665	39.590	90.920
6	-12.370	14.400	26.490	31.927	46.270	93.130
7	-15.430	14.540	31.700	31.752	41.480	86.900
8	-4.180	16.230	41.575	41.001	60.500	96.770
9	-5.050	18.570	48.220	44.778	76.655	89.470
10	-5.940	17.560	38.760	42.989	70.957	93.960
11	-7.830	18.488	46.730	45.940	74.257	96.670
12	-6.000	23.300	51.600	45.918	65.990	98.430
13	-7.640	21.390	56.130	51.896	87.970	106.240
14	-8.880	25.998	50.935	48.706	76.965	107.870
15	-13.790	24.670	56.830	51.808	87.780	105.850
y_shift						
1	-55.220	-20.220	9.220	2.662	28.600	49.500
2	-42.790	-10.445	11.045	9.640	36.075	49.430
3	-42.290	2.345	13.380	12.731	31.330	50.690
4	-34.230	-12.140	12.290	11.856	36.580	55.710
5	-24.840	-4.540	19.900	14.033	28.140	55.360
6	-39.330	-9.610	17.130	14.368	29.850	57.770
7	-34.780	-2.650	16.190	16.381	28.680	69.500

8	-36.510	4.805	23.465	18.985	29.200	64.460
9	-30.700	0.180	17.190	13.951	24.317	76.270
10	-30.800	5.178	16.470	18.278	26.383	77.370
11	-31.410	-6.880	14.450	11.659	21.168	77.000
12	-39.460	-1.950	15.860	16.544	20.270	80.060
13	-12.210	4.220	12.950	13.860	19.250	57.370
14	-19.850	2.518	15.115	13.120	19.345	53.360
15	-28.440	1.240	8.780	7.797	16.210	34.000

Можно сформулировать некоторые выводы, касающиеся способности схемы STEPS прогнозировать объекты в условиях высокой скорости ветра и рекордных порывов.

Ошибки прогноза положения оказываются более высокими по сравнению с ранее рассмотренными примерами оценок сдвигов по ситуациям. По характеру распределения они сильно асимметричны, с систематическими изменениями в экстремальных значениях: минимальная ошибка расположения с ростом заблаговременности по осям x и y снижается, а максимальная ошибка по оси x заметно растет.

По выбранному критерию информативности прогноза удовлетворительными на сроках до часа времени можно считать лишь более четверти, но менее половины выделенных объектов. При этом основная ошибка заключается в прогнозе положения по долготе (x_shift), в то время как по широте ошибка положения с ростом заблаговременности, напротив, снижается вплоть до конца прогностического срока.

Выводы

1. Разработана первая отечественная технология оперативного наукастинга осадков с использованием последовательности данных ДМРЛ-С на срок до двух часов с 10-минутной дискретностью и 10-минутным обновлением. Проведено испытание развернутой системы в теплый период года (май – сентябрь 2017 г.) с точечной и пространственной верификацией качества прогнозов по зонам обзора девяти радаров территории ЕТР.

2. Результаты верификации прогнозов относительно радарных наблюдений показали информативность наукастинга осадков на интервале одного-полутора часов как в точках выделенной сетки, так и по крупным областям сильных осадков. Статистически обеспечены для точечных оценок лишь осадки интенсивностью ≥ 4 мм/ч, а верификация категорий более сильных осадков требует и больших объемов данных, и иных характеристик качества.

3. На основе набора проанализированных ситуаций можно сделать несколько предварительных выводов о качестве прогноза объектов. Во-первых, не менее половины объектов размером 35×35 точек сетки (и больше) по выбранному критерию пересечения удовлетворительно прогнозируются на интервале примерно до полутора часов. Во-вторых, для разных

локаторов отмечаются систематические ошибки, которые возможно учесть в процедурах коррекции.

4. Почти для всех радаров в отдельных и суммарных полях существуют систематические особенности, которые критично влияют на качество наукастинга и на полученные результаты верификации. Систематизировать такие особенности, учесть их в системах коррекции наукастинга или в модернизации схемы STEPS возможно только при тесном взаимодействии со специалистами по радарной метеорологии.

Решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) от 01.12.2017 г. рекомендовано:

– внедрить в оперативную практику ФГБУ «Гидрометцентр России» в качестве основной «Технологию наукастинга интенсивности осадков на срок до 90 минут в теплый период года».

В соответствии с решением ЦМКП от 1 декабря 2017 г. технология наукастинга интенсивности осадков на срок до 90 минут в теплый период года внедрена в оперативную практику ФГБУ «Гидрометцентр России». (Акт внедрения №2-ЦМКП/2018 от 27.02.2018).

Авторы выражают признательность специалистам ЦАО Ю.Б. Павлюкову, А.А. Шумилину и А.В. Травову за подготовку полей радарных данных и организацию оперативного потока этой информации в Гидрометцентр России. Авторы благодарят А.Р. Иванову за ценные замечания и советы при подготовке статьи к печати.

Список литературы

1. *Абдуллаев С.М.* Жизненный цикл мезомасштабных конвективных систем: концепция, климатология и прогноз: Дис. ... докт. геогр. наук. – М., 2010. – 408 с.
2. *Большев Л.Н., Смирнов Н.В.* Таблицы математической статистики. – М.: Наука, 1983. – 416 с.
3. *ВМО-№ 485.* Наставление по глобальной обработке данных и прогнозирования. Том 1. Глобальные аспекты. (Дополнение к IV Техническому регламенту ВМО). – Женева: ВМО, 2010.
4. *Временные* методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического локатора ДМРЛ-С в синоптической практике: 2-я редакция. – М.: Росгидромет, 2017. – 121 с.
5. *Иванова А.Р., Шакина Н.П.* Перспективы развития наукастинга для метеорологического обеспечения авиации в рамках реализации Глобального аэронавигационного плана (ГАНП) // Труды Гидрометцентра России. – 2016. Вып. – 360. – С. 113-134.

6. Муравьев А.В., Д.Б. Киктев, Бундель А.Ю., Дмитриева Т.Г., Смирнов А.В. Верификация прогнозов метеорологических явлений со значительными воздействиями в районе проведения Олимпиады «Сочи-2014». Часть I. Детерминированные прогнозы в тестовый период // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 9. – С. 31-48.

7. Bowler N., Pierce C., Seed A. STEPS: A probabilistic precipitation forecasting scheme which merges an extrapolation nowcast with downscaled NWP // Q. J. R. Meteorol. Soc. – 2006. – Vol. 132. – P. 2127-2155.

8. Ebert E.E. Suggested methods for the verification of precipitation forecasts against high resolution limited area observations (JWGFVR). – Geneva, Switzerland: WMO, November 2013.

9. Ebert E.E., McBride J.L. Verification of precipitation in weather systems: Determination of systematic errors // J. Hydrology. 2000. – Vol. 239. – P. 179-202.

10. *Forecast Verification. A Practitioner's Guide in Atmospheric Science* // I.T. Jolliffe, D.B. Stephenson (Eds). – John Wiley & Sons Ltd, 2012. – 274 p.

11. Gilleland E. Confidence Intervals for Forecast Verification. – NCAR Technical Note NCAR/TN-479+STR, 2010. – DOI:10.5065/D6WD3XJM.

12. *Recommendations for the Verification and Intercomparison of QPFS and PQPFS from Operational NWP Models. Revision 2.* WWRP/WGNE Joint Working Group on Verification // WMO/TD-No. 1485. – Geneva, Switzerland: WMO, October 2008. – 43 p.

13. Schertzer D., Lovejoy S. Physical modeling and analysis of rain and clouds by anisotropic scaling multiplicative processes // J. Geophys. Res. 1987. – Vol. 92. – P. 9692–9714.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МЕТОДА КРАТКОСРОЧНОГО
(до 48 ч) ПРОГНОЗА ЗНАЧЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ, ПРИВЕДЕННОГО
К УРОВНЮ МОРЯ ПО СТАНДАРТНОЙ АТМОСФЕРЕ,
В ПУНКТАХ И ПО ТЕРРИТОРИИ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО
РЕГИОНА РОССИИ ПО ДАННЫМ МОДЕЛИ
WRF-ARW С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ 15 км**

Введение

В связи с введением в действие новой редакции Федеральных авиационных правил «Предоставление метеорологической информации для обеспечения полетов воздушных судов» [4] (далее ФАП-60), прогнозы погоды и сводки о погоде в аэропортах должны содержать информацию о давлении, приведенном к уровню моря по стандартной атмосфере.

Для обозначения давления, приведенного к уровню моря по стандартной атмосфере, в авиации применяется аббревиатура QNH (Question Nautical Height = Вопрос Морская Высота). Значения QNH аэродрома, полученные от наземной диспетчерской службы, используются экипажем воздушного судна для установки барометрического высотомера, который позволяет определять высоту полета в зависимости от величины приземного атмосферного давления.

С мая 2015 года в качестве экспериментальной продукции для метеорологического обслуживания авиации на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока России выполняются расчеты полей QNH по данным мезомасштабной негидростатической модели WRF-ARW (Weather Research and Forecasting – Advanced) [7] с горизонтальным разрешением 15 км и 31 уровнем по вертикали (версия «Хаб-15»). Описание используемой версии модели подробно представлено в [1].

Область прогноза составляет 7500 км на 6000 км с центром в г. Хабаровске и охватывает всю территорию ответственности РСМЦ Хабаровск (рис. 1). Расчеты выполняются два раза в сутки от 00 и 12 ч ВСВ. Прогнозы с заблаговременностью 48 ч готовы к 6.30 и 18.30 ч ВСВ соответственно.

Зона ответственности РСМЦ Хабаровск составляет обширную часть территории северо-восточной Азии и прилегающих морей северо-западной части Тихого океана. В нее входят территории с различными климатическими и физико-географическими условиями. Климат юго-востока, омываемого относительно теплыми морями, характеризуется восточным муссоном. Климат северо-восточной части определяется холодными водами морей, морскими и океаническими течениями северо-западной части Тихого океана. Северные территории включают арктическую зону. Северо-западная и центральная части имеют резко-континентальный климат с обширной территорией вечной мерзлоты. Юго-западная часть характеризуется резко-континентальным климатом, обусловленным влиянием высоких гор и полупустынных районов Монголии и северо-востока Китая.

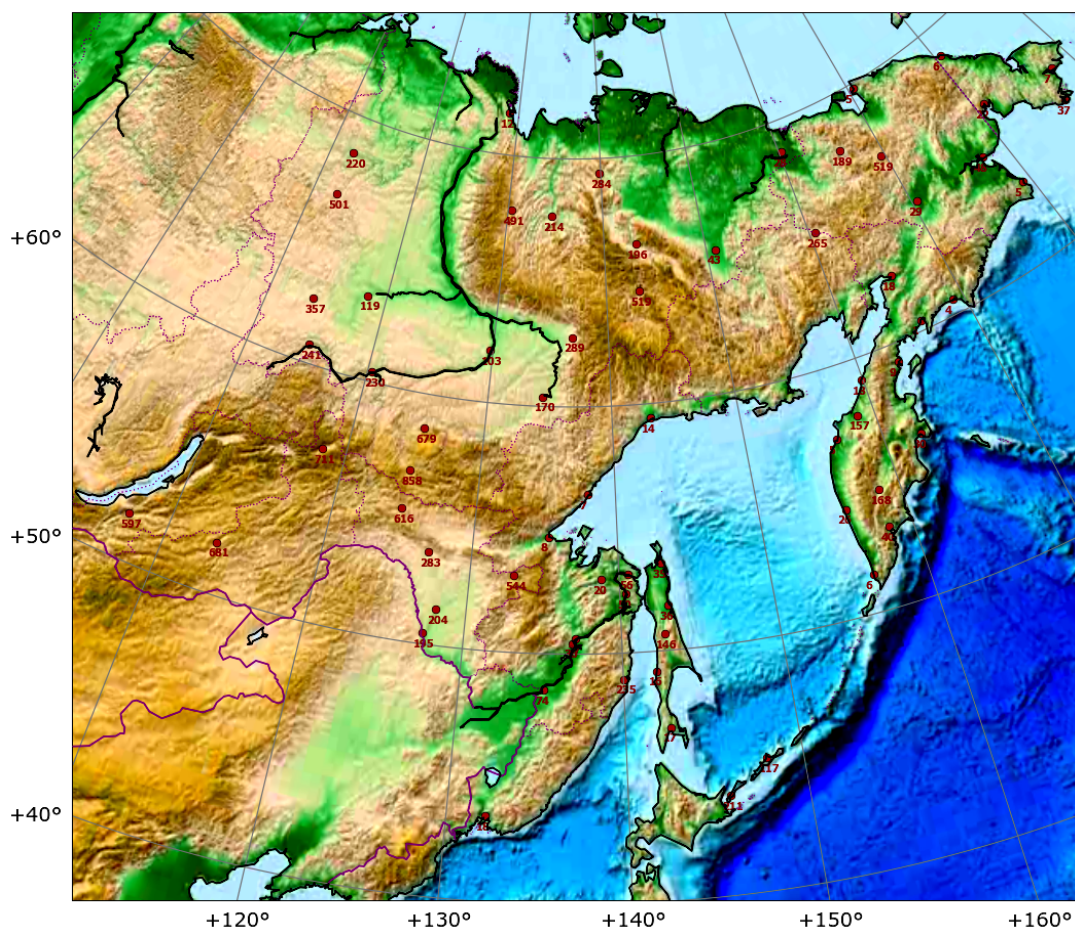


Рис. 1. Территория ответственности РСМЦ Хабаровск.

1. Способ расчета QNH в узлах прогностической сетки

Давление, приведенное к уровню моря по стандартной атмосфере, рассчитывается по модельным значениям давления на уровне подстилающей поверхности p_s в узлах прогностической сетки по классической формуле, приведенной в документации ВМО [6], в рамках собственного постпроцессинга.

$$QNH = p_s \left(1 + \frac{\gamma z}{T_0 \left(\frac{p_s}{p_0} \right)^{\frac{\gamma R_d}{g}}} \right)^{\frac{g}{\gamma R_d}}, \quad (1)$$

где z – высота точки расчета, м; $T_0 = 288,15$ К; $p_0 = 1013,25$ гПа; $g = 9,80665$ м/с; $R_d = 287,05$ Дж/(кг·К), $\gamma = 0,0065$ К/м.

Результаты расчета представляются в виде цифровых полей с наноской значений через 90 км и таблиц QNH в пунктах прогноза. Пример поля представлен на рис. 2.

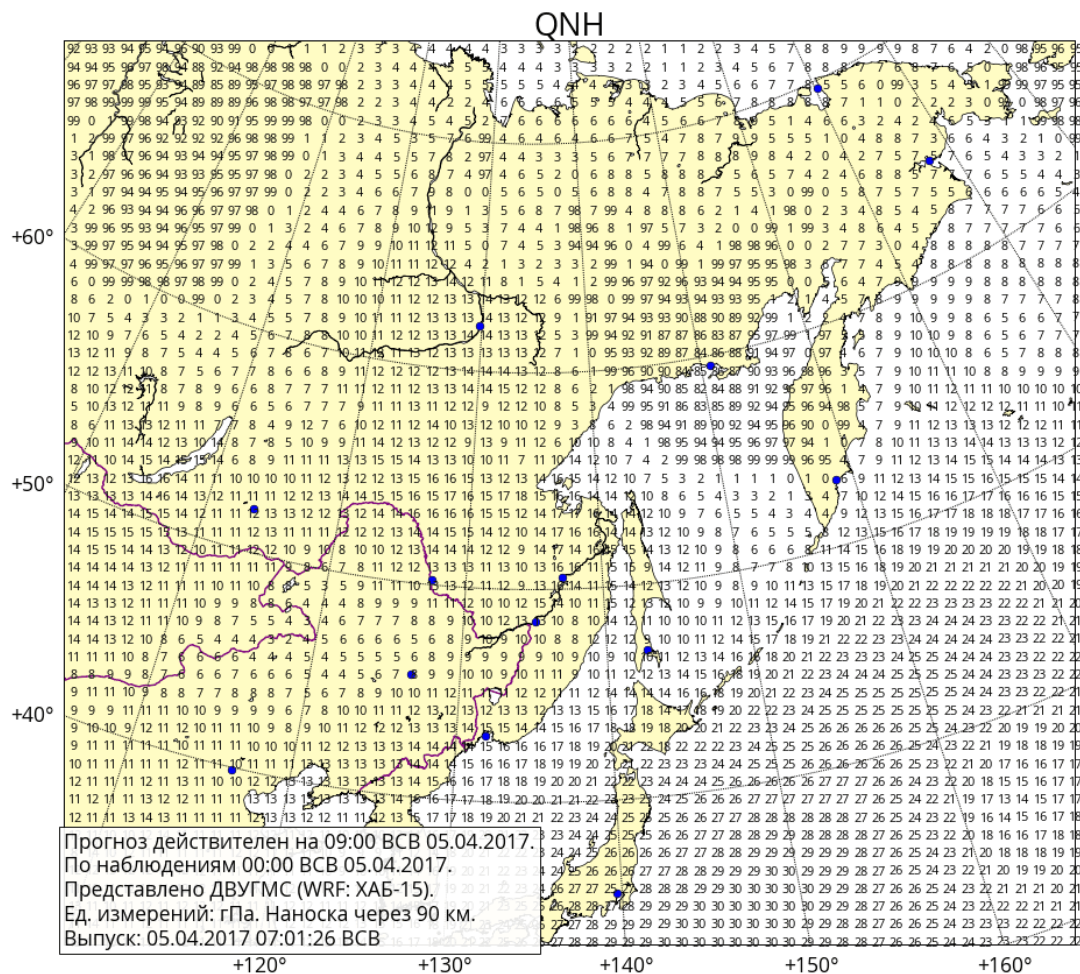


Рис. 2. Пример слайда с прогнозом QNH по модели WRF-ARW «Хаб-15».

2. Цель испытаний

Целью испытаний является определение степени прогностической ценности рассчитываемых прогнозов для применения в производственной практике подразделений Росгидромета, занимающихся метеорологическим обслуживанием авиации на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока России.

Испытания проводились согласно Плану испытаний новых и усовершенствованных методов (технологий) гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов Росгидромета на 2016–2017 гг. Плановый период испытаний: 1 сентября 2016 г. – 28 февраля 2017 года.

3. Порядок проведения испытаний

Для проведения испытаний в рамках НИР 1.1.1.5 в 2016 г. отделом гидрометеорологических исследований и прогнозов ФГБУ «ДВНИГМИ» разработана оперативная технология расчета прогнозов QNH по модели WRF-ARW с горизонтальным шагом 15 км («Хаб-15»). Технология установлена и внедрена в производственную эксплуатацию вычислительного центра ФГБУ «Дальневосточное УГМС» в I квартале 2016 года.

Расчеты прогнозов выполняются два раза в сутки от 00 и 12 ч ВСВ под методическим сопровождением специалистов отдела гидрометеорологических исследований и прогнозов ФГБУ «ДВНИГМИ». Для проведения испытаний прогностическая продукция модели в форме цифровых карт QNH и текстовых таблиц (значения QNH в аэропортах ДВ-региона) фиксировалась на сервере в ФГБУ «Дальневосточное УГМС» и предоставлялась участникам испытаний от ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» через специализированную страницу сайта Дальневосточного УГМС. Якутскому УГМС прогнозы передавались через АСПД, Забайкальскому УГМС – электронной почтой.

Для удобства проведения испытаний всем участникам предоставлялись ежемесячные таблицы данных фактических и прогностических значений QNH в формате Excel со встроенными макросами для автоматического расчета оценок. Для сравнения с продукцией, выпускаемой Гидрометцентром России (ГМЦ) по глобальной спектральной модели T169L31 (единственной доступной авиационным синоптикам ДВ-региона продукции ЧПП в период испытаний), в таблицах оценок качества прогнозов QNH были выделены столбцы для прогнозов по модели ГМЦ, представляемых на сайте ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» в формате цифровых полей. Значения QNH в аэропортах для верификации снимались специалистами испытывающих организаций с указанных карт.

В таблицах оценок прогнозы представляются целыми частями рассчитанного значения в соответствии с кодом METAR [4], и для каждого аэропорта и каждого срока наблюдений рассчитываются следующие характеристики:

– арифметическая и абсолютная погрешности: $E_{ар} = QNH(\text{прогноз}) - QNH(\text{METAR})$,
 $E_{абс} = |E_{ар}|$;

– знаками «+» отмечаются случаи, когда $-1 \text{ гПа} \leq E_{ар} \leq 1 \text{ гПа}$;

– знаками «-» отмечаются все остальные случаи.

В нижней строке таблицы приводятся среднемесячные значения E_{ap} , $E_{абс}$ и значение обеспеченности различий между QNH (прогноз) и QNH (METAR) не более, чем в 1 гПа (обозначается как P_1).

4. Методика испытаний и числовые характеристики оценок качества прогноза

Согласно ФАП-60 [4], прогнозы погоды для аэронавигации должны содержать информацию о минимальном значении QNH в пределах заданного района, а сводки о погоде в аэропортах, передаваемые в кодовой форме METAR, должны содержать информацию об округленных к низу значениях QNH, вычисленных по фактическому измеренному атмосферному давлению.

Пример деления территории Дальнего Востока на районы приведен на рис. 3.

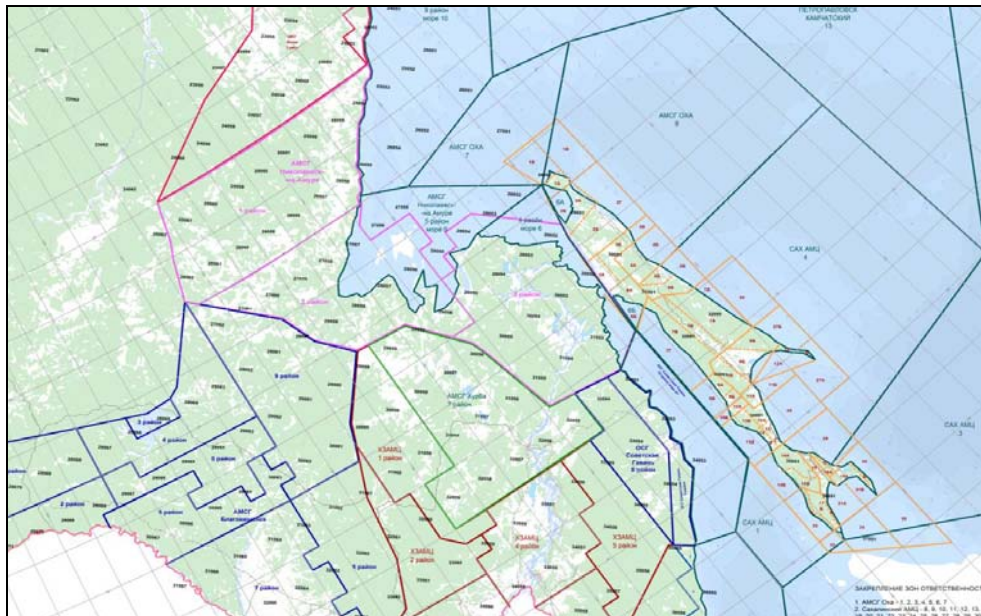


Рис. 3. Пример деления территории ДВ-региона на районы обслуживания.

Вполне очевидно, что оценить фактическое минимальное значение QNH в пределах заданного района по данным METAR невозможно: не в каждом из районов есть аэропорты (пункты наблюдений), а там, где они есть, на каждый район приходится не более 1–2 аэропортов.

Ранее в отечественной практике аэронавигации применялось минимальное значение приземного давления в заданном районе обслуживания, которое снималось с метеорологических карт приземного давления, приведенного к уровню моря по фактической погоде. Источники такой информации регламентировались, задача оценки качества прогнозов не ставилась.

При использовании QNH необходимо решить не только задачу расчета полей значений QNH в узлах прогностической сетки, но и разработать методологию оценки качества прогнозов для практического применения в аэронавигации. Здесь можно предложить два подхода. С одной стороны, поскольку фактическая информация, передаваемая в коде METAR, относится к пунктам (аэропортам), то логично оценивать качество прогнозов в пункте. Для этого необходимо определить прогнозируемое значение QNH в пункте наблюдений по данным в узлах прогностической сетки. С другой стороны, поскольку на практике применяется прогноз минимального значения QNH по районам, то необходимо иметь оценку поля QNH в целом по рассматриваемому региону. При этом следует учитывать, что критерии оценки качества (оправдываемости) прогнозов QNH, приведенные в ФАП-60, относятся к «прогнозам для взлета», то есть к аэропортам (пунктам взлета).

Для реализации первого подхода рассчитывались значения QNH в пунктах (аэропортах ДВ-региона) и передавались участникам испытаний в форме таблиц. Значения QNH в пунктах рассчитывались по модельным значениям давления на высоте пункта прогноза (p_z), которое вычислялось по барометрической формуле [3]:

$$p_z = p_s \cdot \left(1 + \frac{\gamma(h-z)}{T_2(1+0,607q_2)} \right)^{\frac{g_\varphi}{\gamma R_d}}, \quad (2)$$

$$g_\varphi = 9,80616 \cdot (1 - 0,0026373 \cos 2\varphi + 0,0000059 \cos^2 2\varphi),$$

где h – высота узла сетки; z – высота пункта прогноза (аэропорта); p_s , T_2 , q_2 – прогностические приземные атмосферное давление, температура воздуха и фактическое влагосодержание в узле сетки вблизи пункта прогноза, g_φ – ускорение свободного падения на широте φ пункта.

В качестве пунктов прогноза при испытаниях использовались аэропорты, расположенные на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока России, поскольку только в этих пунктах определяются фактические значения QNH инструментальным или методическим способом и передаются по каналам связи в коде METAR. При таком подходе в ошибку прогноза входит совокупность погрешностей модельных прогнозов T_z , q_z , p_z , горизонтальная изменчивость прогнозируемой величины на расстоянии от узла сетки до пункта прогноза и отличие реального значения вертикального градиента температуры от стандартного ($\gamma = 0,0065$ К/м).

Оценку качества прогнозов полей QNH (значений в узлах прогностической сетки) по данным метеорологической сети наблюдений можно выполнить, сравнивая прогностические

значения QNH со значениями, рассчитанными по формуле (1) по наблюдаемым значениям приземного давления, поступающим по каналам связи в коде КН-01. Пунктов наземных наблюдений существенно больше, чем аэропортов, что дает возможность набрать более полную статистику. При таком подходе в ошибку прогноза войдет только совокупность погрешностей прогноза QNH в узле модельной сетки, пространственной изменчивости QNH на расстоянии от пункта наблюдения до узла сетки и отличие реального значения вертикального градиента температуры от стандартного. Правомочность предложенного подхода необходимо утвердить через решение Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета. Поэтому в процессе испытаний использовался стандартный подход к расчету оценок качества прогнозов в пунктах наблюдений (аэропортах) с применением критериев качества прогнозов, приведенных в [5] и с учетом требований Приложения 1 и данных о точности измерений QNH, приведенных в Приложении 2, ФАП-60 [4].

Прогнозы QNH оценивались по 66 аэропортам Восточной Сибири и Дальнего Востока России, расположенным в различных физико-географических условиях и климатических зонах: 11 пунктов на территории Чукотки; 12 пунктов на территории Камчатki; 16 пунктов на территории Хабаровского края, Амурской области и ЕАО; 7 пунктов на территории Сахалинской области; 18 пунктов на территории Республики Саха (Якутия); 2 аэропорта на территории Забайкалья. Схема расположения аэропортов на рассматриваемой территории приведена на рис. 4.

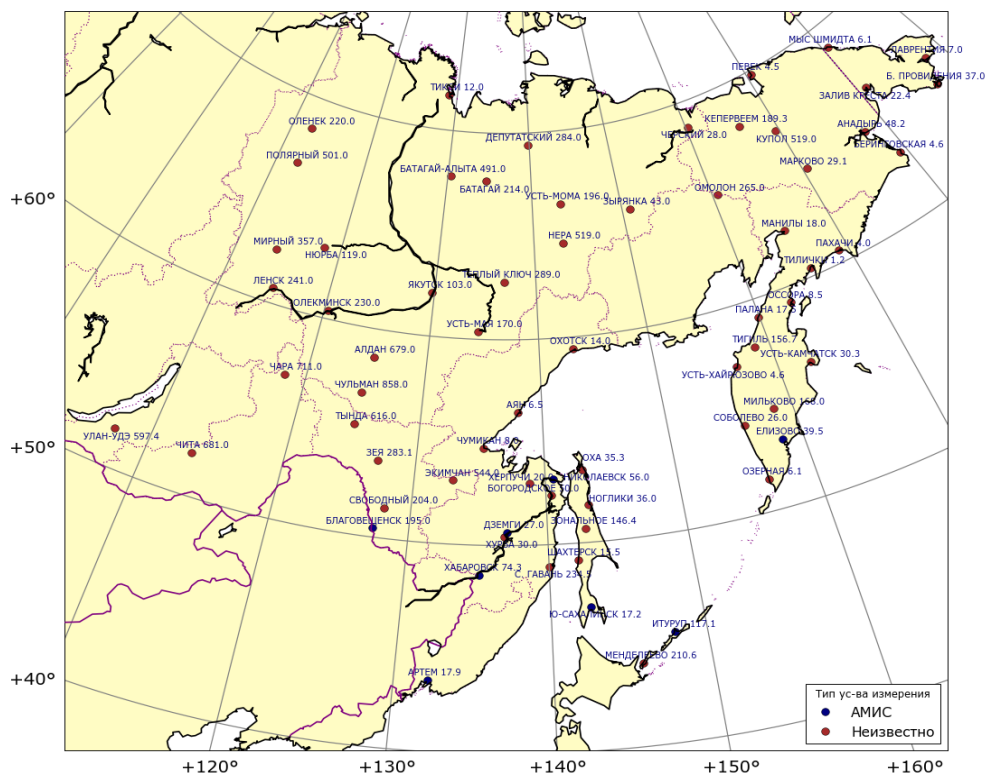


Рис. 4. Схема расположения аэропортов на территории ДВ-региона России.

5. Числовые характеристики для оценки качества прогнозов

Качество прогнозов QNH оценивалось по обеспеченности ошибки в заданных градациях 1, 2 и 3 гПа, соответственно, обозначаемых P_1 , P_2 и P_3 , средней арифметической ($E_{ар}$) и средней абсолютной ($E_{абс}$) ошибкам:

$$E_{ар} = QNH(\pi) - QNH(\phi), \quad E_{абс} = |E_{ар}|, \quad (3)$$

где « π » обозначает прогноз, а « ϕ » соответствует факту (по данным в кодовой форме METAR).

В ФАП-60 приведены критерии качества прогнозов QNH «для взлета»: обеспеченность ошибки прогноза QNH в градации 1 гПа должна составлять не менее 90 %. Несложно показать, что это требование соответствует точному совпадению фактического (без округления книзу) и прогностического значений QNH (без округления книзу):

$$[QNH(\pi)] - [QNH(\phi)] = QNH(\pi) - QNH(\phi) - (\Delta(\pi) - \Delta(\phi)), \quad (4)$$

где $[\cdot]$ – операция взятия целой части числа.

Тогда требованиям ФАП-60 соответствует неравенство:

$$-1 \text{ гПа} \leq QNH(\pi) - QNH(\phi) - (\Delta(\pi) - \Delta(\phi)) \leq +1 \text{ гПа}$$

$$\text{или } 0 \leq QNH(\pi) - QNH(\phi) \leq 0.$$

Таким образом, приемлемым качеством прогноза QNH для аэронавигации, согласно ФАП-60, следует считать различия целых частей прогностического и фактического значений QNH не более 2 гПа в 90 % случаев.

6. Результаты испытаний

В процессе анализа и обобщения результатов испытаний все перечисленные характеристики качества осреднялись ежемесячно и посезонно для каждого аэропорта, территории ответственности каждого из участников испытаний и физико-географического положения пунктов прогноза для заблаговременностей +15, +18, +21 и +24 ч.

Для анализа по каждой территории выделялось три варианта физико-географического положения пунктов прогноза с выделением одного специфического аэропорта, качество прогнозов в котором имело самое низкое значение и существенно отличалось от остальных пунктов.

На территории Чукотки выделялись северное побережье (аэропорты Певек и Мыс Шмидта), восточное побережье (аэропорты Залив Лаврентия, Бухта Проведения, Залив Креста, Анадырь, Беринговская) и континентальная часть (Кепервеем, Купол, Марково,

Омолон). Особым пунктом считался аэропорт Омолон, расположенный в удалении от остальных пунктов, практически на границе с Магаданской областью.

Территория Камчатки делилась на восточное побережье (Манилы, Палана, Усть-Хайрюзово, Соболево, Озерная), западное побережье (Пахачи, Тилички, Оссора, Усть-Камчатск) и континентальная часть (Тигиль, Мильково, Елизово). К особым пунктам отнесен аэропорт Мильково, расположенный в континентальной части полуострова в долине между горными хребтами.

На территории ответственности Дальневосточного филиала ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» выделялись морское побережье (Охотск, Аян, Николаевск, Сов. Гавань, Артем), долина Амура (Херпучи, Богородское, Дземги, Хурба, Хабаровск, Благовещенск) и внутриконтинентальные аэропорты (Экимчан, Тында, Зeya, Свободный). В качестве особого пункта принят аэропорт Чумикан, расположенный в устье реки Уды вблизи побережья Охотского моря (около 5 км до побережья).

Территория республики Саха (Якутия) делилась на западную часть (к западу от р. Лена: Полярный, Мирный, Нюрба, Якутск), восточную часть (к востоку от р. Лена: Теплый Ключ, Депутатский, Батагай, Усть-Мома, Усть-Нера, Зырянка, Черский, Тикси) и южную часть (Ленск, Олекминск, Усть-Мая, Алдан, Чульман). В качестве особого пункта рассматривался аэропорт Усть-Нера. Отметим, что по поведению оценок качества прогнозов аэропорт Усть-Мома мало отличается от Усть-Неры.

На территории Сахалинской области рассматривались аэропорты Оха, Ноглики, Зональное, Шахтерск, Итуруп, Менделеево без выделения районов и особого пункта. Также в целом рассматривалась территория Забайкалья, на которой функционируют (выпускаются телеграммы в коде METAR) только два аэропорта: Чита и Улан-Удэ.

Результаты испытаний показывают, что качество прогнозов QNH различно для различных территорий и аэропортов, сезонов и месяцев года. В теплый период года качество прогнозов высокое и удовлетворяет требованиям ФАП-60 практически во всех аэропортах и в среднем по территориям. В холодный период года (особенно зимой) значения P_2 падают до 80 % и ниже и вновь начинают возрастать весной.

Известно, что качество прогнозов падает с заблаговременностью. Каждая заблаговременность прогноза соответствует определенному стандартному метеорологическому сроку. Рассматриваемая территория занимает пять часовых поясов, и каждый стандартный срок по ВСВ соответствует различному времени суток в аэропортах, расположенных в различных часовых поясах. В табл. 1 представлено соответствие между стандартными сроками суток, сроками старта модели, заблаговременностями прогнозов и местным временем. Данные табл. 1 показывают, что на каждый срок прогноза в течение суток приходится одна заблаго-

временность в интервале от +15 до +24 ч. В табл. 1 представлены только те заблаговременности прогнозов, которые возможно получить в настоящее время к указанному сроку не позднее, чем за 2 ч до его наступления, но не более 30 ч, поскольку прогнозы большей заблаговременности не используются в авиационной практике.

Таблица 1. Соотношение между стандартными сроками по ВСВ, сроками старта модели, заблаговременностями прогнозов и местным временем суток

Срок	ВСВ		Местное время				
	Заблаговременность при старте		Чукотка, Камчатка	Сахалин	Хабаровск	Якутия, Забайкалье	Улан-Удэ
	от 12 ч	от 00 ч					
00	+12	+24	12	11	10	09	08
03	+15	+27	15	14	13	12	11
06	+18	+30	18	17	16	15	14
09	+21	+09	21	20	19	18	17
12	+24	+12	00	23	22	21	20
15	+27	+15	03	02	01	00	23
18	+30	+18	06	05	04	03	02
21	+09	+21	09	08	07	06	05

Известно и подробно представлено в [2], что качество численных прогнозов приземных характеристик погоды имеет выраженный сезонный ход на рассматриваемой территории и менее выраженный суточный ход. Данные табл. 2 иллюстрируют суточный и сезонный ход обеспеченности прогнозов QNH с точностью до 2 гПа (P_2). В табл. 2 данные расположены по срокам (времени суток). Заблаговременности представлены в левом крайнем столбце, нижний индекс указывает срок старта модели.

Соотношения между различными заблаговременностями проиллюстрировано графиками на рис. 5. Из приведенных данных видно, что для одного и того же периода осреднения (месяц, сезон) качество прогнозов на различные сроки предстоящих суток различно. Оно зависит от заблаговременности прогноза и местного времени суток. Снижение качества прогнозов с заблаговременностью может в ряде случаев нивелироваться суточным ходом прогнозируемой величины, так что прогнозы большей заблаговременности могут иметь более высокие значения характеристик качества, чем прогнозы, рассчитанные с меньшей заблаговременностью.

Соотношение между характеристиками P_1 , P_2 , P_3 представлено на рис. 6. Графики рис. 6 показывают, что значение P_1 имеет сезонный ход, идентичный P_2 . Значения P_1 редко превышают уровень 90 %. Уровень обеспеченности прогнозов с погрешностью не более 1 гПа наблюдается летом и осенью в основном в прибрежных пунктах, иногда в континентальной части Амурской области и Якутии.

Таблица 2. Среднесезонные значения обеспеченности прогноза QNH с точностью до 2 гПа (P₂) по модели WRF-ARW «Хаб-15»

Период		Л	О	З	В	Л	О	З	В	Л	О	З	В	Л	О	З	В	Л	О	З	В
Заб.ср.ст.	срок	Чукотка				Северный берег				Восточный берег				Континент				Омолон			
+21 ₀₀	09	98	90	80	91	98	97	88	93	97	93	81	93	98	80	77	86	100	71	59	84
+2400	12	96	88	77	84	95	96	77	89	96	91	80	88	95	80	73	76	95	67	59	79
+1512	15	99	92	83	89	98	97	79	88	99	92	85	92	98	89	83	85	100	84	75	82
+1812	18	99	91	87	88	100	89	82	91	100	93	89	88	97	90	85	85	100	84	-	88
Заб.ср.ст.	срок	Камчатка				Западный берег				Восточный берег				Континент				Мильково			
+2100	09	89	84	71	82	81	84	79	85	97	84	71	85	92	83	62	76	93	79	21	72
+2400	12	87	81	70	78	78	81	78	82	97	78	73	82	89	83	61	73	86	77	28	72
+1512	15	92	88	82	88	81	88	89	95	100	89	81	95	97	88	75	82	93	90	62	80
+1812	18	93	86	74	82	86	92	100	91	100	94	91	78	93	84	73	82	79	85	56	76
Заб.ср.ст.	срок	ДВ-филиал				Побережье				Долина Амура				Континент				Сахалинская обл.			
+2400	10	96	88	77	74	98	90	74	77	96	87	78	71	92	90	79	74	99	86	75	80
+1512	13	98	94	83	85	99	92	82	87	98	94	87	84	96	97	92	82	100	95	87	89
+1812	16	97	91	82	77	99	90	77	81	98	89	83	76	94	96	89	73	99	90	85	86
+2112	19	97	88	81	72	98	89	77	79	96	87	84	68	100	100	-	68	98	88	77	82
Заб.ср.ст.	срок	Якутия				Западнее Лены				Восточнее Лены				Южная Якутия				Забайкалье			
+2400	09	91	87	78	75	96	96	87	78	87	78	71	75	90	90	78	72	83	90	71	-
+1512	12	97	94	85	84	99	98	94	85	94	87	73	85	98	97	89	81	93	94	78	72
+1812	15	94	92	84	80	99	97	90	80	90	84	75	84	96	96	87	74	94	95	77	-
+2112	18	93	90	81	76	98	96	88	81	91	83	72	77	90	93	83	68	83	90	74	-

Примечание. В таблице приняты следующие обозначения: Л – лето, О – осень, З – зима, В – весна; ———
Заб.ср.ст. – заблаговременность прогноза от указанного в нижнем индексе срока старта.

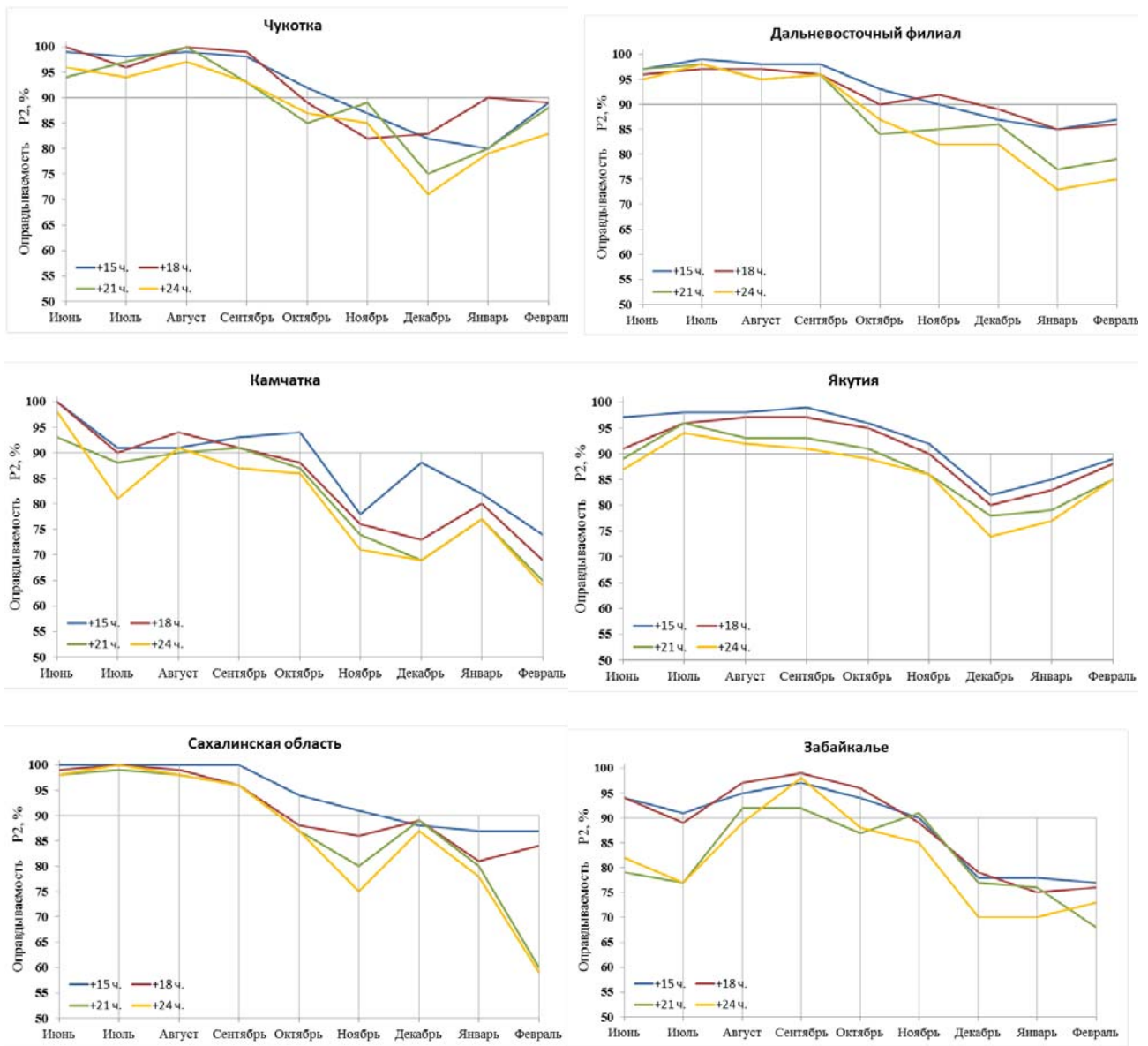


Рис. 5. Сравнение значений P_2 по заблаговременностям.

На рис. 7 представлено сравнение временного хода P_1 и P_2 для различных территорий, видно, что отклонение прогностического значения QNH от фактического на величину, более чем 1 гПа, наблюдается на территории Забайкалья (2 пункта) и Камчатки, а наименьшее – на территории Сахалинской области, что вполне соответствует особенностям географического положения пунктов прогноза и рельефу местности.

Величина P_2 имеет минимальное значение на территории Камчатки практически на всем периоде испытаний. Забайкальская кривая P_2 располагается выше Камчатской вплоть до декабря и опять поднимается в феврале. Сахалинская кривая P_1 держится на самом высоком уровне в период июнь – сентябрь и резко падает с октября по декабрь, опускаясь ниже Забайкальской, Хабаровской и Якутской, а Сахалинская кривая P_2 держится на самом высоком уровне весь период испытаний.

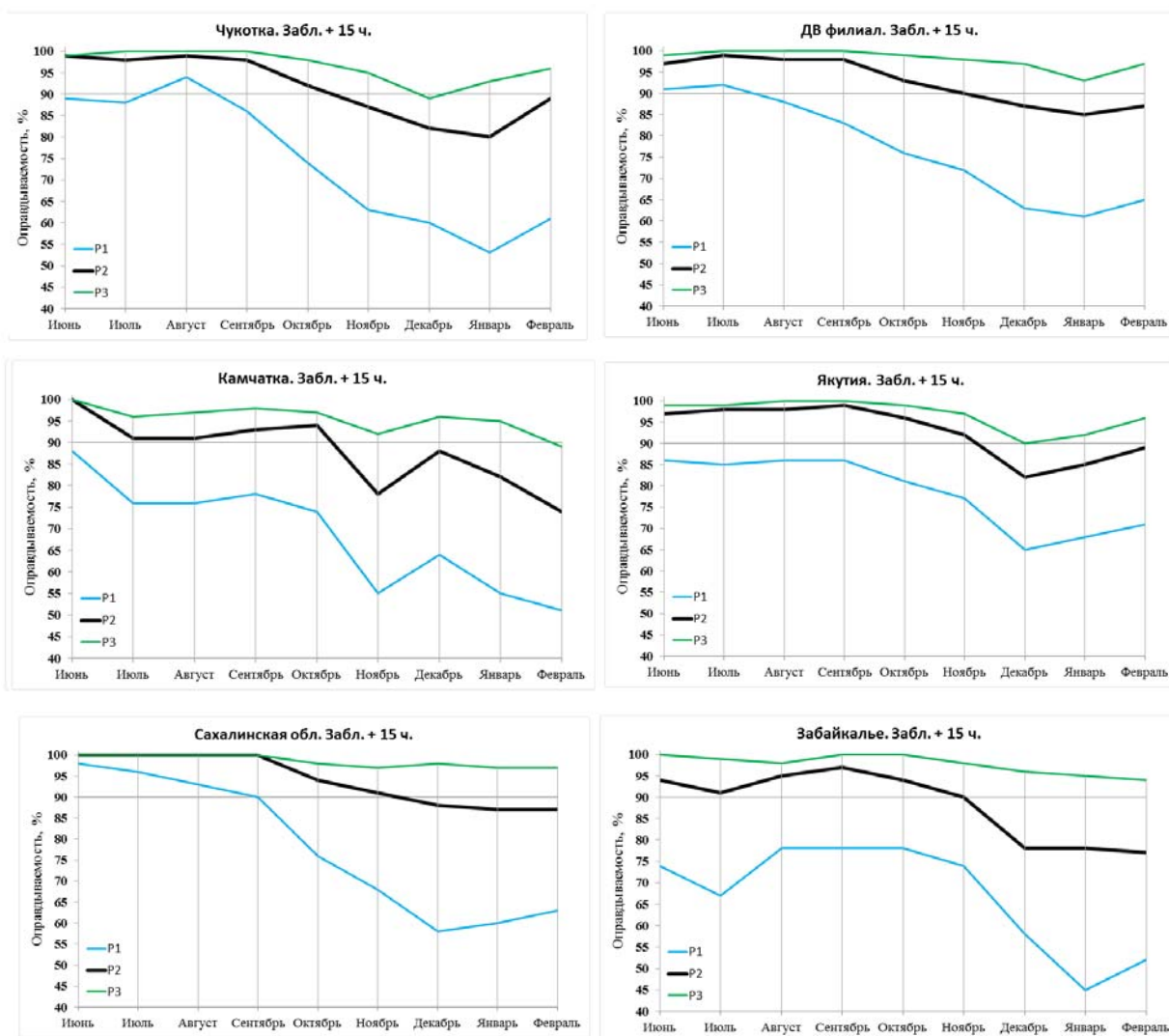


Рис. 6. Временной ход P_1 , P_2 , P_3 для различных территорий.

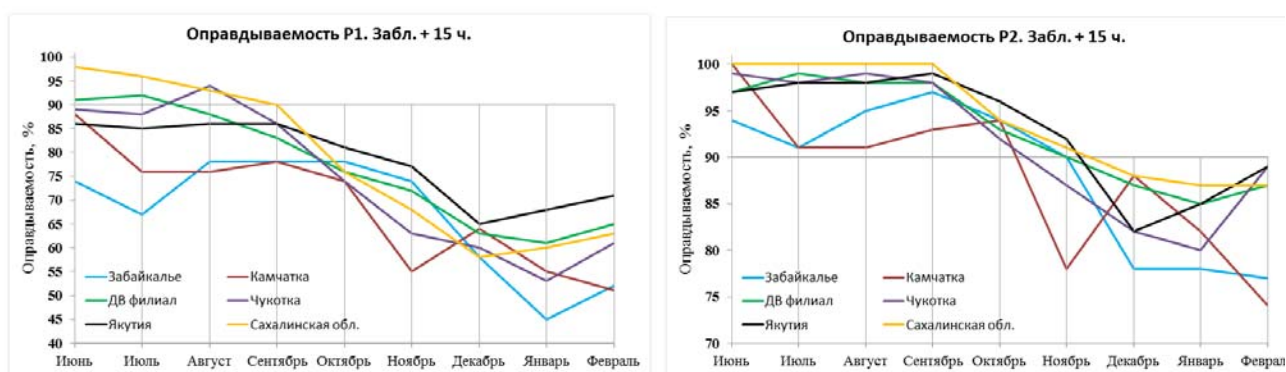


Рис. 7. Сравнение временного хода P_1 , P_2 для различных территорий.

Характеристика P_3 представлена на графиках рис. 8 для иллюстрации процента ошибок, больше либо равных 3 гПа. Из графиков видно, что значения P_3 колеблются в интервале 95–100 %, однако в декабре опускаются до 90 % на территории Якутии и Чукотки.

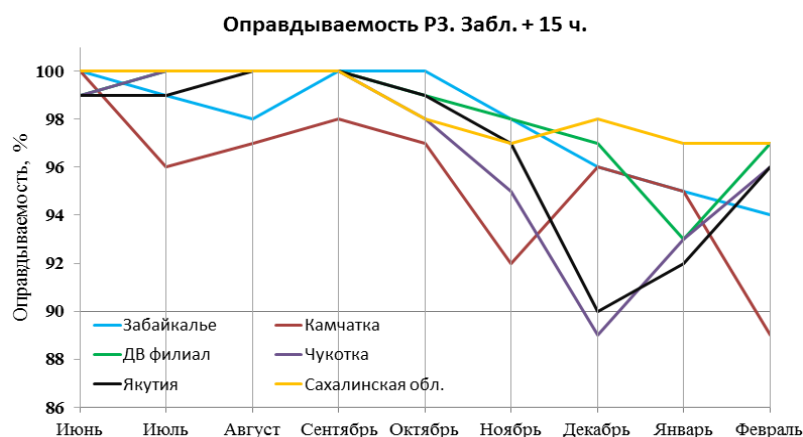


Рис. 8. Процент ошибок более 3 гПа для различных территорий и месяцев года.

На графиках рис. 8 видно, что количество ошибок более 3 гПа резко возросло в феврале для станций, расположенных на территории Камчатки – начались весенние перестройки.

Ситуации и пункты прогнозов, в которых наблюдается слишком большое количество ошибок, превышающих 3 гПа, анализировались отдельно для выявления причин их возникновения. Ошибки в координатах пунктов прогноза были выявлены в процессе испытаний по пунктам Чукотки (станция Беринговская – ошибка в положении около 90 км, Залив Лаврентия – ошибка в положении около 150 км). Ошибки в высоте пункта замечены в процессе испытаний в аэропорту Палана. Кроме того, были замечены неточности описания береговой линии в модели в районе расположения пунктов Чумикан и Николаевск-на-Амуре – береговая линия сливается с о. Сахалин как единое пространство суши.

Существенное влияние на значения характеристик качества прогнозов могут оказывать погрешности прогноза приземной температуры и влажности в зимний период в узлах сетки, расположенных на внутриконтинентальной территории Восточной Сибири и Дальнего Востока России (Восточная Якутия, Забайкалье, Магаданская область) [2].

Для иллюстрации вышеизложенного на рис. 9 представлен временной ход P_2 по каждой территории с детализацией по физико-географическому положению аэропортов и выделением «особых» пунктов с наиболее низким качеством прогнозов.

На территории Чукотки мы выделили аэропорт Омолон, который входит в группу внутриконтинентальных станций. Омолон расположен на границе с Магаданской областью вдали от остальных континентальных пунктов Чукотки в небольшом распадке между сопками на высоте 265 м. Расстояние до ближайшего узла, высота которого 271 м, составляет около 3 км. Судя по физико-географическому положению, узел сетки попадает на склон сопки через распадок. Здесь важно выяснить ориентацию склонов (юг, север и т. д.) и попытаться найти узел сетки, более близкий по физико-географическому положению к расположению

аэропорта. При горизонтальном разрешении модели в 15 км такой узел может и не найтись, и повысить качество прогнозов можно будет только статистическим способом. При повышении горизонтального разрешения модели задача может решиться сама собой.

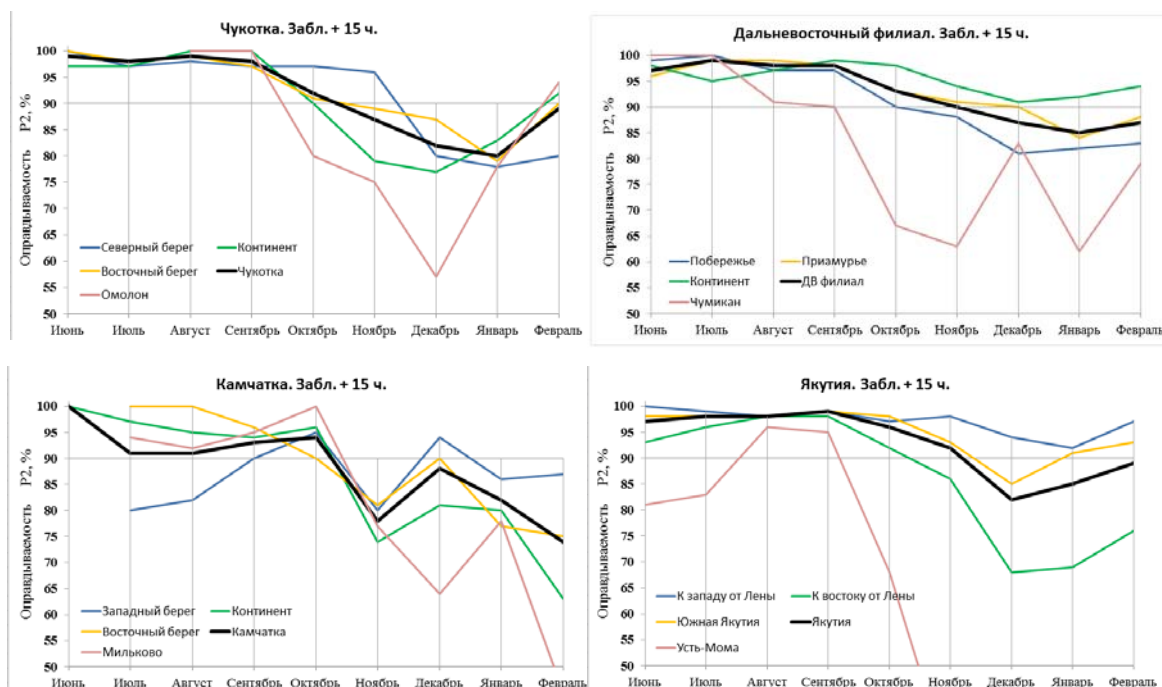


Рис. 9. Сравнение P_2 для различных территорий, физико-географических районов и особых станций.

На территории Камчатки выделен аэропорт Мильково, расположенный в долине между двумя горными хребтами практически у подножья сопки. Его высота составляет 125 м, расстояние до узла около 3 км, высота узла 153 м. Судя по поведению характеристик качества прогнозов, проблема та же, что и для пункта Омолон – узел сетки попадает на склон сопки с другой географической ориентацией.

Аэропорт Чумикан Хабаровского края расположен вблизи побережья Охотского моря, высота над уровнем моря составляет 8 м, расстояние до узла сетки около 7 км, высота узла 17 м. Разность высот в 9 м может давать погрешность чуть больше 1 гПа. Процедура приведения приземного давления в узле сетки к уровню пункта прогноза зимой может вносить существенные ошибки за счет погрешностей прогноза температуры и влажности.

На территории Якутии в качестве особого пункта прогноза выбран аэропорт Усть-Мома: высота 196 м, расстояние до узла около 5 км, высота узла 437 м. Этот пункт также расположен в предгорьях (узкой долине) на юго-западном склоне, а ближайший узел – выше в горах. Здесь, вероятнее всего, существенную ошибку вносит процедура приведения приземного давления к высоте аэропорта по температурному градиенту стандартной атмосферы в холодный период года. Аналогичное поведение оценок наблюдается и в аэропорту Усть-Нера, расположенном в горной местности на высоте 519 м. Расстояние до ближайшего

узла составляет всего 1 км, но высота узла 860 м. Очевидно, что в высокогорье приведение приземного давления от уровня узла к уровню аэропорта по температурному градиенту для стандартной атмосферы вносит существенные ошибки. Кроме того, прогностические значения приземной температуры и влажности на территории Якутии к востоку от р. Лены имеют наибольшие погрешности в холодный период года [2].

Анализ значений средней арифметической и средней абсолютной ошибок прогнозов QNH показывает, что большие значения $E_{абс}$ (не менее 2,5 гПа) приходится на зимний период. На Чукотке это северный берег (+18 ч) и континент (+24 ч), при этом систематической погрешности не наблюдается (значения $E_{ар}$ невелики). На Камчатке это восточный берег (+21 и +24 ч) и континент (+24 ч), при этом наблюдается заметная отрицательная систематическая ошибка, то есть прогнозируемое значение давления в среднем по территории ниже фактического. Большие значения $E_{абс}$ наблюдаются зимой на территории Восточной Якутии по всем заблаговременностям с наличием существенной систематической погрешности отрицательного знака. На других территориях среднесезонные значения $E_{абс}$ выше 2 гПа не наблюдаются.

По данным, представленным участниками испытаний, проводилось сравнение прогнозов QNH по модели WRF-ARW («Хаб-15») с прогнозами по глобальной спектральной модели Гидрометцентра России T169L31. Результаты сравнения представлены в табл 3 и 4. Здесь приводятся осредненные по выделенным физико-географическим районам среднесезонные значения разностей P_1 , P_2 , P_3 и $E_{абс}$ методического (по модели WRF-ARW «Хаб-15») и верификационного (по модели Гидрометцентра России T169L31 (ГМЦ)) прогнозов. Разности берутся так, чтобы положительное значение показывало преимущество испытываемой модели над верификационной, а отрицательное значение разности показывало преимущество верификационной модели (ГМЦ) над испытываемой, то есть $\Delta P = P(WRF) - P(ГМЦ)$, $\Delta E_{абс} = E_{абс}(WRF) - E_{абс}(ГМЦ)$. Значения N в таблицах указывают количество случаев в выборке, по которому можно определить степень статистической обеспеченности приведенных результатов сравнения.

В табл. 3 представлены разности оценочных характеристик по территориям Чукотки (зона ответственности Северо-восточного филиала ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета») и Камчатки (зона ответственности Камчатского филиала ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета»). Эти филиалы выполняли верификацию в период с 1 сентября 2016 г. по 28 февраля 2017 г. в соответствии с Планом испытаний Росгидромета на 2016–2017 гг., поэтому данные сравнения приведены только за осень 2016 г. и зиму 2016–2017 годов.

Таблица 3. Сравнение качества прогнозов QNH по испытываемой модели «Хаб-15» с верификационной T169L31 (ГМЦ)

Сравнение WRF – ГМЦ	ОСЕНЬ					ЗИМА					ОСЕНЬ					ЗИМА				
	N	ΔP_1	ΔP_2	ΔP_3	ΔE_{abc}	N	ΔP_1	ΔP_2	ΔP_3	ΔE_{abc}	N	ΔP_1	ΔP_2	ΔP_3	ΔE_{abc}	N	ΔP_1	ΔP_2	ΔP_3	ΔE_{abc}
	+15 ч										+18 ч									
Чукотка	601	19	17	13	0.9	206	9	12	5	1.4	186	30	20	18	1.3	68	22	33	31	1.9
Северный берег	107	22	20	9	0,7	38	21	19	16	0.9	10	30	11	0	0.6	4	0	25	50	2.0
Восточный берег	278	12	8	4	0.3	85	11	13	-1	0.3	64	19	8	6	0.7	28	18	32	18	0.7
Континент	216	26	28	27	1.6	83	2	7	5	2.8	112	36	27	27	1.7	36	28	34	39	2.8
	+21 ч										+24 ч									
Чукотка	587	24	24	16	1.1	243	21	26	20	1.4	584	23	23	18	1.1	244	19	27	25	1.1
Северный берег	103	36	23	11	1.1	42	33	50	31	1.4	104	31	26	10	0.9	42	14	31	30	1.1
Восточный берег	273	18	15	6	0.4	114	9	10	7	0.4	270	19	14	10	0.5	112	9	16	15	0.5
Континент	211	27	35	32	2.1	87	30	35	32	2.7	210	23	32	33	2.1	90	34	38	36	2.1
	+15 ч										+18 ч									
Камчатка	661	20	17	12	0,8	661	18	22	19	1,0	255	19	17	13	1,0	227	34	38	32	1,9
Западный берег	243	21	14	9	0,8	245	19	12	7	0,5	12	16	25	9	0,5	4	50	25	25	1,2
Восточный берег	148	21	8	5	0,6	135	7	19	18	0,6	32	16	5	1	0,3	11	9	27	18	0,7
Континент	270	18	25	18	0,9	281	23	31	31	1,7	211	20	18	15	1,1	212	35	39	33	2,0
	+21 ч										+24 ч									
Камчатка	788	22	22	18	1,1	856	17	17	17	1,1	767	18	20	16	1,0	820	13	18	18	1,1
Западный берег	279	21	19	14	0,8	307	14	14	10	0,6	272	22	15	13	0,9	302	7	13	11	0,5
Восточный берег	214	21	19	13	0,9	247	8	7	9	0,5	213	12	12	10	0,8	229	9	15	12	0,7
Континент	295	24	26	25	1,4	302	26	28	30	2,1	282	18	30	24	1,3	289	23	26	31	2,1

Данные табл. 3 показывают уверенное преимущество прогнозов QNH по испытываемой модели над прогнозами по верификационной модели. Основной причиной такого преимущества является, безусловно, горизонтальное разрешение модели «Хаб-15» в 15 км в сравнении с данными модели ГМЦ, рассчитанными с горизонтальным разрешением $1,25^\circ$ (т. е. около 130 км по 60-ой параллели).

Максимальное преимущество модели «Хаб-15» наблюдается для внутриконтинентальных аэропортов, минимальное – по восточному побережью, что естественно с физико-географической точки зрения. Малое преимущество прогнозов по северному берегу Чукотского полуострова с заблаговременностью +18 ч статистически не обеспечено (10 случаев осенью и 4 зимой). Отрицательное значение ΔP (+15 ч) зимой по восточному берегу Чукотки, как и в целом наименьшее преимущество «Хаб-15» над T169L31 (ГМЦ) для этой территории, обусловлено ошибками в координатах аэропортов Залив Лаврентия и Беринговская, указанных выше. После внесения исправлений качество прогнозов по этим пунктам существенно возросло.

В любом случае, минимальное преимущество над прогнозами T169L31 (ГМЦ) на восточном побережье Чукотки и Камчатки обусловлено небольшими высотами пунктов прогноза и гладкой поверхностью моря, на которое попадают узлы сетки модели ГМЦ.

В табл. 4 приведены разности оценочных характеристик по территории ответственности Дальневосточного филиала ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», включающей на начало периода испытаний Хабаровский край, Амурскую область, Еврейскую автономную область и Приморский край. Сахалинская область была присоединена к ДВ-филиалу с 1 января 2017 г. и в процессе верификации не учувствовала, поэтому данных сравнения по аэропортам, расположенным на о. Сахалин и Курильских островах нет.

Специалисты ДВ-филиала «Авиаметтелеком Росгидромета» начали верификацию с июня 2016 г., так что по территории их ответственности есть данные за летние месяцы. Максимальное и весьма существенное преимущество (до 50 %) прогнозов по испытываемой модели над верификационной наблюдается летом в пунктах, расположенных по долине Амура.

Осенью это преимущество снижается до 35 % и постепенно перемещается к континентальным аэропортам. Зимой максимальное преимущество качества испытываемых прогнозов над верификационными переходит к континентальным пунктам и составляет весьма существенную величину (по P_1 от 29 % для заблаговременности +24 ч до 49 % для заблаговременности +15 ч). Для P_2 это преимущество достигает 53–55 % для прогнозов +18 и +15 ч.

Минимальное преимущество по аэропортам ДВ-филиала наблюдается в прибрежных пунктах, при этом оно существенно летом (до 33 % по P_1), снижается осенью (до 13–18 % по

R₁) и теряется зимой по всем заблаговременностям, кроме +24 ч. Для остальных заблаговременностей (сроков) прогноза в среднем по побережью в зимний период года наблюдается преимущество прогнозов T169L31 (ГМЦ). Этот факт привел нас к выводу о необходимости проверить адекватность описания береговой линии в модели «Хаб-15». Как выяснилось, пункты Аян, Чумикан, Николаевск, Богородское оказались в несоответствующих физико-географических условиях.

Таблица 4. Сравнение качества прогнозов QNH по испытываемой модели «Хаб-15» с верификационной T169L31 (ГМЦ) по территории ДВ-филиала «Авиаметтелеком»

Сравнение WRF – ГМЦ	Лето					Осень					Зима				
	N	ΔP_1	ΔP_2	ΔP_3	ΔE_{abc}	N	ΔP_1	ΔP_2	ΔP_3	ΔE_{abc}	N	ΔP_1	ΔP_2	ΔP_3	ΔE_{abc}
	+15 ч														
ДВ-филиал	1571	39	22	8	1,1	1560	24	22	12	0,8	1366	18	20	15	1,0
Побережье	533	30	8	2	0,7	527	13	15	8	0,4	438	-6	-4	-1	-0,1
Долина Амура	800	48	33	12	1,4	784	28	26	14	1,0	690	22	23	14	0,7
Континент	238	29	18	10	0,9	249	35	24	12	1,1	238	49	55	48	3,9
+18 ч															
ДВ-филиал	1534	48	30	13	1,4	1531	24	67	11	0,9	1402	11	15	13	0,9
Побережье	514	36	20	6	0,9	510	17	15	6	0,5	473	-12	-8	0	-0,1
Долина Амура	796	58	39	17	1,8	775	26	115	15	1,2	691	16	17	11	0,7
Континент	224	40	25	13	1,1	246	31	24	11	0,9	238	38	53	44	3,6
+21 ч															
ДВ-филиал	1281	41	27	9	1,2	1293	23	22	12	0,9	1083	8	11	7	0,4
Побережье	477	30	16	4	0,6	517	15	17	8	0,6	438	-6	-4	-1	0,0
Долина Амура	804	48	33	12	1,5	776	28	25	14	1,1	645	18	20	13	0,6
Континент	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
+24 ч															
ДВ-филиал	1548	42	29	14	1,1	1584	25	21	9	0,9	1456	19	17	13	1,1
Побережье	538	33	24	15	0,6	542	18	14	10	0,7	516	13	4	2	0,4
Долина Амура	783	51	33	12	1,4	787	30	25	5	0,9	700	20	17	11	0,6
Континент	227	32	27	23	1,3	255	23	24	17	1,1	240	29	44	43	3,7

Для завершенности исследования рассчитывались оценки качества инерционного прогноза. К сожалению, для ряда пунктов и заблаговременностей данных для оценки слишком мало. Во избежание статистической необеспеченности оценок в табл. 5 и 6 приведены только те данные, которые рассчитаны по выборкам длиной не менее 10 случаев.

В табл 5 приведены среднесезонные значения R₂ инерционного прогноза для заблаговременностей от +09 до +24 ч. Расчеты показывают существенно более низкое качество инерционных прогнозов рассматриваемых заблаговременностей в сравнении с модельными прогнозами и систематическое падение качества инерционных прогнозов с заблаговременностью, в отличие от модельных.

Таблица 5. Сезонные значения P_2 инерционного прогноза QNH

Забл.	Л	О	З	В	Л	О	З	В	Л	О	З	В	Л	О	З	В	Л	О	З	В
	Чукотка				Северный берег				Вост. берег				Континент				Омолон			
+09	58	74	54	74	-	73	-	75	-	-	54	-	-	-	-	-	-	-	-	-
+12	-	54	48	65	-	55	-	65	-	-	49	-	-	-	-	-	-	-	-	-
+15	-	50	39	50	-	45	-	50	-	-	39	-	-	-	-	-	-	-	-	-
+18	-	50	34	50	-	-	-	50	-	-	33	-	-	-	-	-	-	-	-	-
+21	37	33	32	52	33	33	45	47	38	29	27	54	38	38	35	48	31	34	32	35
+24	36	30	29	49	31	31	39	39	33	29	24	32	43	29	34	45	47	27	35	34
Забл.	Камчатка				Западный берег				Вост. берег				Континент				Мильково			
+09	81	49	51	58	-	-	-	-	-	-	-	-	79	51	51	57	44	91	-	-
+12	68	38	33	50	-	-	-	-	-	-	-	-	68	38	33	50	-	-	-	-
+15	59	32	31	44	-	-	-	-	-	-	-	-	59	32	31	44	-	-	-	-
+18	48	32	27	42	-	-	-	-	-	-	-	-	48	32	27	42	-	-	-	-
+21	46	25	30	41	42	28	31	46	40	23	44	39	47	24	28	38	35	24	36	42
+24	40	25	28	38	42	29	32	45	36	26	30	36	42	22	25	32	47	24	29	35
Забл.	ДВ-филиал				Побережье				Долина Амура				Континент				Сахалинская обл.			
+09	74	66	64	60	77	68	62	64	71	65	66	59	40	-	-	51	83	58	57	62
+12	73	59	54	54	74	59	51	57	73	59	56	54	-	-	-	36	75	44	45	55
+15	68	54	46	47	67	55	45	48	68	53	47	48	-	-	-	29	68	37	40	45
+18	61	44	39	40	59	46	37	43	62	43	40	39	-	-	-	30	58	34	39	44
+21	57	40	37	39	55	42	35	43	57	39	39	38	61	-	-	26	53	33	34	36
+24	52	38	36	38	53	38	32	42	53	36	36	38	48	40	44	28	51	32	30	35
Забл.	Якутия				Западнее Лены				Восточнее Лены				Южная Якутия				Забайкалье			
+09	64	76	61	54	70	80	59	50	54	76	69	60	64	73	57	55	54	64	61	47
+12	57	69	51	43	59	71	50	41	48	70	59	48	60	65	46	43	52	56	54	46
+15	53	62	43	37	54	64	42	35	45	62	51	42	57	57	41	37	55	51	46	43
+18	49	55	36	32	50	60	35	30	42	53	44	33	52	51	33	35	55	45	45	38
+21	42	51	34	31	46	55	33	31	35	48	39	34	46	49	30	32	49	41	41	33
+24	38	47	32	28	38	50	31	27	34	45	36	31	43	47	28	29	44	37	36	32

Расчет оценок инерционного прогноза на близлежащие сроки (до +06 ч) выполнялся с целью оценки периода времени, на который можно использовать инерционный прогноз в практических целях. Результаты расчета представлены в табл. 6, из которой видно, что инерционным прогнозом можно пользоваться на ближайшие 3 ч от сроков наблюдений практически на всей территории Дальнего Востока России за исключением Камчатки, для аэропортов которой P_2 инерционного прогноза не ниже 90 % гарантировано только на ближайшие 2 часа.

Выводы

Полученные результаты показывают, что прогнозы значений QNH в аэропортах, расположенных на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока России, по модели «Хаб-15» в целом успешны в летние месяцы года и имеют более низкое качество зимой. В переходные сезоны года качество прогнозов различно для различных физико-географических районов и конкретных аэропортов.

Таблица 6. Сезонные значения P_2 инерционного прогноза QNH для малых заблаговременностей

Период	Л	О	З	В	Л	О	З	В	Л	О	З	В	Л	О	З	В	Л	О	З	В
Забл.	Чукотка				Северный берег				Восточный берег				Континент				Омолон			
+01	100	100	99	100	100	100	100	100	100	100	99	100	100	100	99	99	100	100	100	100
+02	99	99	97	100	98	99	98	100	100	99	96	100	99	98	97	99	100	98	96	98
+03	97	94	91	99	93	96	92	99	100	94	90	99	92	93	94	98	90	94	94	93
+04	90	88	86	97	87	92	89	96	95	86	85	98	79	88	87	93	65	90	87	85
+05	81	82	81	93	72	85	83	91	89	80	77	95	71	83	85	89	60	79	87	83
+06	72	80	75	92	69	90	73	96	76	78	73	94	64	77	81	89	53	76	-	89
Забл.	Камчатка				Западный берег				Восточный берег				Континент				Мильково			
+01	100	99	99	100	100	99	99	100	100	100	99	100	100	99	99	100	100	100	99	100
+02	100	94	93	98	100	96	93	99	99	93	93	98	100	95	92	98	100	98	88	97
+03	98	88	84	93	100	91	89	97	91	84	85	94	99	88	81	90	91	88	73	87
+04	93	80	78	87	100	88	87	96	83	78	79	89	93	78	73	82	75	76	58	77
+05	88	73	71	78	96	82	85	92	78	77	71	84	87	70	69	73	68	74	60	72
+06	84	63	63	72	-	-	-	-	-	-	-	-	83	62	62	71	57	73	59	73
Забл.	ДВ филиал				Побережье				Долина Амура				Континент				Сахалинская обл.			
+01	100	100	100	100	100	100	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
+02	99	99	99	99	99	99	99	99	100	99	99	98	99	100	99	98	99	99	98	98
+03	98	96	95	94	98	95	93	98	99	96	95	93	94	97	98	92	97	93	92	94
+04	95	89	88	87	96	87	86	96	96	89	89	86	91	90	93	83	95	84	81	83
+05	90	81	81	78	91	79	77	91	91	82	82	79	83	83	86	71	90	79	74	76
+06	86	77	76	71	87	76	73	87	86	77	75	72	87	76	84	65	87	74	70	70
Забл.	Якутия				Западнее Лены				Восточнее Лены				Южная Якутия				Забайкалье			
+01	100	100	100	99	100	100	100	99	100	100	100	100	100	100	100	99	100	100	100	100
+02	99	99	99	97	99	99	99	97	99	99	99	99	99	100	98	96	99	99	99	98
+03	96	98	95	92	98	98	95	91	94	98	95	95	96	98	94	91	98	98	97	92
+04	91	96	89	84	95	96	90	83	85	94	92	87	92	96	87	84	93	93	92	83
+05	85	91	84	75	90	92	83	75	76	89	88	76	86	93	81	72	86	87	85	76
+06	79	88	77	68	84	89	77	67	70	85	83	69	81	88	73	68	60	81	78	68

Рекомендации авторов по применению прогнозов QNH по модели «Хаб-15» по территориям ответственности подразделений Росгидромета, занимающихся метеорологическим обслуживанием авиации на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока России, приведены в табл. 7. Для каждого аэропорта следует пользоваться среднемесячными данными оценок качества прогнозов, полученных в период испытаний, и текущих данных, располагаемых на сайте ФГБУ «Дальневосточное УГМС».

Таблица 7. Рекомендации авторов по использованию прогнозов QNH по модели WRF-ARW («Хаб-15») по районам ДВ-региона России

УГМС	Лето	Осень	Зима	Весна
Чукотка (11)	Основной	Основной	Вспомогательный	Основной
Северный берег (2)	Основной	Основной	Вспомогательный	Основной
Восточный берег (5)	Основной	Основной	Вспомогательный	Основной
Континент (4)	Основной	Основной	Вспомогательный	Вспомогательный
Камчатка (12)	Основной	Основной	Вспомогательный	Вспомогательный
Западный берег (5)	Основной	Основной	Вспомогательный	Основной
Восточный берег (4)	Основной	Основной	Вспомогательный	Вспомогательный
Континент (3)	Основной	Основной	Консультативно	Консультативно
Сахалин (7)	Основной	Основной	Вспомогательный	Вспомогательный
ДВ-филиал (17)	Основной	Основной	Вспомогательный	Вспомогательный
Побережье (7)	Основной	Основной	Вспомогательный	Вспомогательный
Долина Амура (6)	Основной	Основной	Вспомогательный	Вспомогательный
Континент (4)	Основной	Основной	Вспомогательный	Вспомогательный
Якутия (17)	Основной	Основной	Вспомогательный	Вспомогательный
К западу от Лены (4)	Основной	Основной	Основной	Вспомогательный
К востоку от Лены (8)	Основной	Основной	Консультативно	Вспомогательный
Ю,жная Якутия (5)	Основной	Основной	Вспомогательный	Вспомогательный
Забайкалье (2)	Основной	Основной	Консультативно	Консультативно

Решение ЦМКП Росгидромета: ЦМКП одобрила работу ФГБУ «ДВНИГМИ» по разработке метода и оперативной технологии расчета прогнозов приземного давления, приведенного к уровню моря по стандартной атмосфере (QNH) по данным модели WRF-ARW с горизонтальным разрешением 15 км.

ЦМКП рекомендовала:

– метод краткосрочного (до 48 ч) прогноза значений давления, приведенного к уровню моря по стандартной атмосфере (QNH) по данным модели WRF-ARW с горизонтальным разрешением 15 км, внедрить в оперативную практику ФГБУ «Дальневосточное УГМС» в качестве вспомогательного;

– подразделениям, осуществляющим метеорологическое обслуживание авиации на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока России использовать результаты расчетов QNH в качестве вспомогательного материала;

– авторам учесть высказанные на заседании ЦМКП предложения и пожелания специалистов прогностических подразделений Росгидромета, отвечающих за метеорологическое обслуживание авиации в ДВ-регионе, по совершенствованию качества прогнозов QNH на рассматриваемой территории с учетом физико-географических и климатических особенностей каждой из территорий и пунктов прогноза (действующих аэропортов). Обратить особое внимание на пункты, расположенные в сложных физико-географических условиях, определяющих существенные систематические ошибки прогноза в холодный период года.

Список литературы

1. *Вербицкая Е.М., Романский С.О.* Применение высокопроизводительных систем для численного прогноза погоды в Дальневосточном регионе России // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2015. – № 3. – С. 131–140.

2. *Вербицкая Е.М., Романский С.О.* Результаты испытаний краткосрочных оперативных прогнозов мезомасштабной модели WRF-ARW «Хаб-15» в пунктах Дальневосточного региона России // Информационный сборник № 43 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2016. – С. 32–62.

3. Методические указания по приведению атмосферного давления к уровню моря и вычислению высот изобарических поверхностей на метеорологических станциях. – Л.: Гидрометеоиздат, 1979. – 11 с.

4. Приказ Минтранса России от 03.03.2014 № 60 «Об утверждении Федеральных авиационных правил «Предоставление метеорологической информации для обеспечения полетов воздушных судов». – Режим доступа:

http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_169199/ (дата обращения 30.04.2017).

5. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиофизических прогнозов. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1991. – 77 с.

6. CIMO/ET-Stand-1/Doc. 10 Pressure reduction formula. – Geneva: WMO, 2012. – 32p. – Режим доступа: https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/meetings/SI/ET-Stand-1/Doc-10_Pressure-red.pdf (дата обращения 30.04.2017).

7. WRF-ARW user's guide v. 3.4. – Boulder: NCAR, 2013. – 384 p. – Режим доступа: http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3.4/ARWUsersGuideV3.4.pdf (дата обращения: 01.05.2017).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ВЕРСИЙ МЕТОДА РАСЧЕТА БАЛЛА ОБЛАЧНОСТИ ПО ВЫХОДНОЙ ПРОДУКЦИИ МОДЕЛИ WRF-ARW

Введение

В Вычислительном центре Регионального специализированного метеорологического центра Всемирной службы погоды в г. Хабаровске (РСМЦ Хабаровск) функционирует система численных прогнозов погоды (система ЧПП) на базе негидростатической модели Weather Research and Forecasting (WRF) с динамическим ядром Advanced Research WRF (WRF-ARW) [13] для территории Восточной Сибири и Дальнего Востока России (ДВ-регион) под названием «Хаб-15» [2], результаты испытаний которой рассмотрены Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета в 2015 году [3].

54

Согласно Плану испытаний новых и усовершенствованных методов (технологий) гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов Росгидромета на 2015–2016 гг., испытывались методы расчета балла облачности для территории Восточной Сибири и Дальнего Востока по выходной продукции региональной негидростатической мезомасштабной модели WRF-ARW «Хаб-15» с горизонтальным разрешением 15 км, разработанные в рамках НИР 1.1.1.5 Плана НИР Росгидромета на 2014 год. Период испытаний – с 1 апреля 2015 г. по 28 февраля 2016 года.

1. Компонента расчета балла облачности постпроцессинга оперативной версии модели WRF-ARW

Компонента расчета балла облачности (полей и значений в пунктах) разработана по запросу Ситуационного центра Росгидромета и многочисленным просьбам синоптиков прогностических подразделений Росгидромета, расположенных на территории ответственности РСМЦ Хабаровск. Задача выпуска прогноза полей облачности была поставлена Ситуационным центром Росгидромета в ноябре 2012 г., куда поставляются поля приземного давления,

осадков и ветра по оперативной версии модели WRF-ARW «Хаб-15». Местоположение облачности используется синоптиками для уточнения положения приземных и высотных фронтов. Балл облачности в пунктах учитывается при составлении прогнозов приземной температуры, особенно суточных экстремумов.

В систему постпроцессинга Unified Post Processor (UPP) версии 2.2 (от 18 апреля 2014 г.), поставляемую с моделью WRF-ARW, входит блок расчета общего балла облачности и балла облачности по ярусам. Для определения балла облачности используется схема Жао-Карр-Морти [10, 14], которая оперирует следующими гидрометеорами: водяной пар, жидкие или твердые частицы воды. Данная схема позволяет определить облачность в ячейке с горизонтальными размерами, превышающими 10 км, и работает достаточно быстро.

В результате работы постпроцессинга (UPP) генерируются четыре поля: балл облачности верхнего, среднего и нижнего ярусов и общий балл облачности. Судя по тексту программы, каждое из этих полей рассчитывается отдельно. Результаты сохраняются в файлах формата GRIB. Для получения прогностической продукции эти поля используются в неизменном виде.

При построении совместных карт прогнозов облачности и осадков было замечено, что зоны осадков не всегда совпадают с положением облачности. Пример такого прогноза приведен на рис. 1. Причиной этого является несоответствие параметризации микрофизики Томпсона [11], используемой в первоначальной версии модели, и связанной с ней методики прогноза осадков с методологией определения облачности. Поэтому были выполнены работы по подбору параметризации микрофизики с целью согласования расположения зон облачности и осадков на рассматриваемой территории [4]. Тестировались схемы Томпсона, Феррьера и WRF Single Moment версий 5 (WSM5) и 6 (WSM6).

Прогнозы по схемам WSM5 и WSM6 [9] оказались близки: зоны расположения осадков и облачности практически согласованы между собой. Прогностическое положение зон облачности и осадков сравнивалось со спутниковыми данными (визуально). Пример сравнения представлен на рис. 2, где показано положение облачности, полученное со спутника для интервала времени около 3–6 ч ВСВ 4 июля 2014 г. На спутниковом снимке видна зона равной облачности около г. Читы, которая не была сгенерирована UPP по данным модели, использующей схему Томпсона, но получилась при использовании схем WSM5 и WSM6.

Таким образом по результатам визуального анализа соответствия положения зон облачности и осадков для разных параметризаций микрофизических процессов было решено использовать в оперативном варианте модели «Хаб-15» схему микрофизики WSM6.

Для оценки возможности использования прогноза балла облачности (полей и значений в пунктах) в оперативной практике УГМС Дальневосточного региона проводились оперативно-производственные испытания в течение 2015–2016 гг.

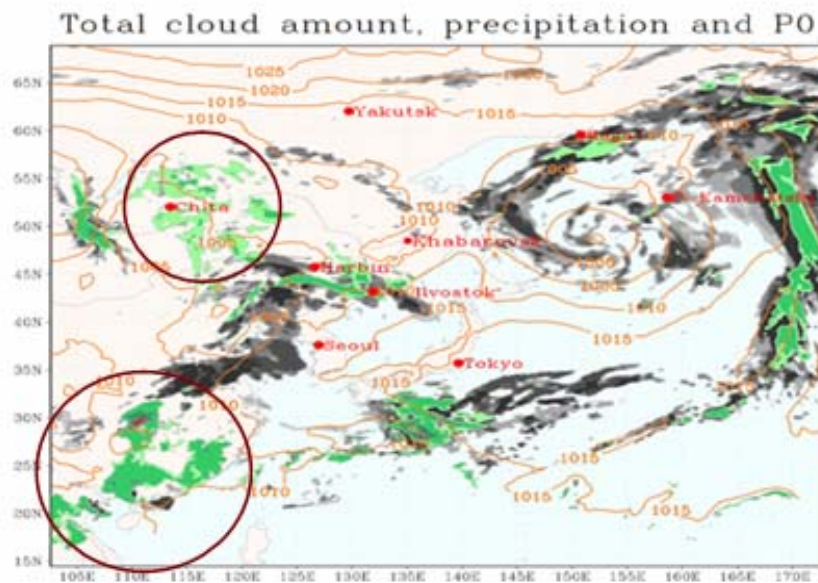


Рис. 1. Прогноз общего балла облачности на срок 03 ч ВСВ 8 июля 2014 г. по данным модели WRF-ARW версии 3.4.1 (параметризация микрофизики по схеме Томпсона). Кругами выделены зоны осадков, которые не согласованы с полем облачности.

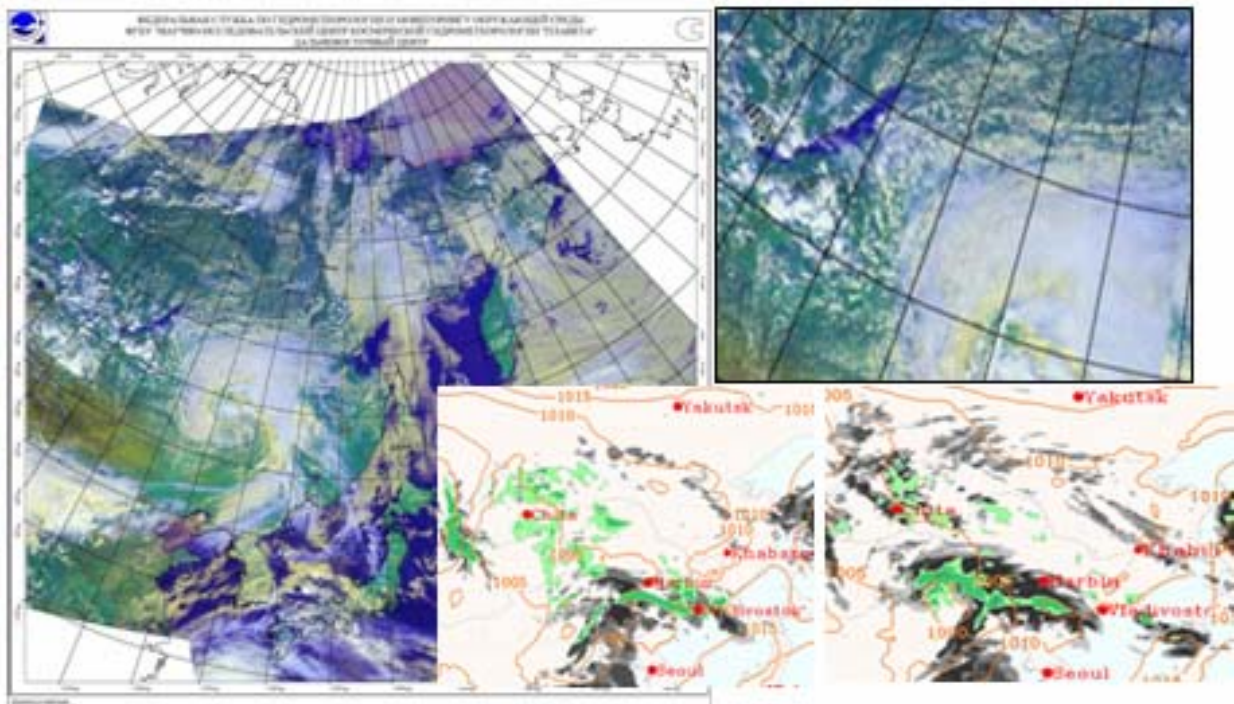


Рис. 2. Сравнение местоположения облачности по версиям модели WRF-ARW и спутниковым снимкам.

Поскольку наблюдения за баллом облачности выполняются в пунктах наблюдений (на метеорологических и аэрологических станциях), то и оценки качества прогнозов считались по пунктам, в которых выполняются наблюдения. Здесь следует заметить, что несмотря на то, что выпуск прогностических полей облачности осуществляется достаточно широко, мы не нашли публикаций по оценке качества численных прогнозов этого элемента погоды.

Оценка выполняется визуально в сравнении со спутниковыми снимками [8, 9, 12]. Числовых характеристик качества прогноза балла облачности в пунктах, за исключением работ [1, 7], нам найти не удалось.

Определенных требований к методологии и характеристикам оценок качества прогноза балла облачности в пунктах или по территории нет ни в Наставлении [5], ни в Методических указаниях [6]. Поэтому при испытаниях использовалась совокупность оценок, аналогичных характеристикам, применяемым при прогнозе осадков.

2. Анализ и сравнение данных наблюдений за баллом облачности от различных наблюдательных платформ

При проведении испытаний объектом моделирования является балл облачности в пункте. Поэтому данный раздел посвящен результатам анализа и исследования характерных особенностей моделируемого объекта над территорией Восточной Сибири и Дальнего Востока.

Данные наблюдений о наличии и балле облачности поступают от станций наземных наблюдений в коде КН-01 (SYNOP) и от станций радиозондирования (нижний или средний ярус) в коде КН-04 (TEMP). Балл облачности передается в октетах, при расчете оценочных характеристик кодовая цифра 2 расценивалась как 2,5 (3) балла, а октет 6 – как 7,5 (8) баллов.

С целью анализа степени совпадения данных о наличии и балле облачности в заданном пункте, поступающих от различных наблюдательных платформ, было выполнено сравнение данных в кодовых формах КН-01 и КН-04. Результаты сравнения приведены в табл. 1, из данных которой видно, что полное совпадение наблюдается не более, чем в 33 % случаев, однако в 90 % случаев различие составляет не более 3 баллов.

Таблица 1. Сравнение данных о балле облачности от наблюдательных платформ КН-01 и КН-04

	Всего	$ \Delta N_h = 0$	$ \Delta N_h \leq 1$	$ \Delta N_h \leq 2$	$ \Delta N_h \leq 3$	$ \Delta N_h \leq 4$	$ \Delta N_h \leq 5$	$ \Delta N_h > 5$
N	1377	456	935	1099	1237	1294	1334	43
%	100	33	68	80	90	94	97	3

Примечание. N – количество случаев, когда облачность была измерена обеими видами наблюдений; N_h – балл облачности (нижний или средний ярус), $\Delta N_h = N_h(\text{КН-01}) - N_h(\text{КН-04})$.

В синоптической практике применяются следующие термины для обозначения степени покрытия неба облаками [5]: ясно (до 3 баллов для облачности среднего и/или нижнего яруса или любое количество облаков верхнего яруса); облачно с прояснениями

(4–7 баллов для нижнего или среднего яруса или сочетание облаков среднего и нижнего ярусов общим количеством до 7 баллов); облачно (8–10 баллов для нижнего яруса или плотных непросвечивающих форм облаков среднего яруса). Опираясь на указанные выше термины, в работе рассматривались следующие категории облачности: ясно (до 3 баллов), переменная облачность (4–7 баллов) и облачно (8–10 баллов). Анализ распределения данных по категориям в испытываемой выборке приведен в табл. 2. Из табл. 2 следует, что в целом данные от разных наблюдательных платформ показывают различное распределение облачности по категориям.

По данным радиозондирования облачность среднего и нижнего ярусов распределена по категориям «ясно» и «переменная облачность» практически равномерно, а по данным наземных наблюдений частота категории «ясно» почти в два раза выше, чем частота категории «переменная облачность». Аналогичное распределение по категориям показывает и выборка, построенная по данным, когда категории КН-01 и КН-04 совпадают. Частота категории «облачно» по всем выборкам имеет примерно одинаковое соотношение по отношению к совокупности категорий «ясно» и «переменная облачность» и колеблется от 14 до 19 %.

Таблица 2. Анализ распределения данных наблюдений за баллом облачности по категориям

Выборка	Количество случаев	Ясно (0–3 балла)	Переменная облачность (4–7 баллов)	Облачно (8–10 баллов)	Ярус
Совпадение данных по КН-01 и КН-04	800	60 %	26 %	14 %	нижний или средний
КН-04	1377	42 %	39 %	19 %	
КН-01		56 %	29 %	15 %	общий
		13 %	34 %	53 %	
		-43 %	+ 5 %	+ 38 %	

Примечание. Δ – разница между общим баллом облачности и нижним или средним ярусом по данным в коде КН-01.

Отметим, что для общего балла облачности по данным КН-01 частота категорий «ясно» и «облачно» практически поменялись местами, а частота категории «переменная облачность» увеличилась мало (на 5 %). Это говорит о том, что для рассматриваемой территории сплошную облачность (8–10 баллов) формируют в значительной степени облака верхнего яруса (38 %). Результаты сравнения категорий облачности, определенных по данным от различных наблюдательных платформ, приведены в табл. 3 и 4.

Обеспеченность $U = (n_{11} + n_{22}) \cdot N^{-1}$ определения категорий по данным наблюдений от различных наблюдательных платформ составила 58 % по категориям в целом; 70 % для категории «ясно» и «переменная облачность и облачно»; 83 % для категории «ясно и переменная облачность» и «облачно»; 90 % в категории «ясно» и «облачно». Здесь n_{11} –

количество случаев, когда совпали категории, упомянутые первыми; n_{22} – количество случаев, когда совпали категории, упомянутые вторыми; N – общее количество случаев.

Таблица 3. Сравнение данных о балле облачности по категориям (по данным в кодах КН-01 и КН-04)

	Категории совпали				Категории не совпали
	Всего	Ясно	Переменная облачность	Облачно	
Количество случаев	800	475	211	114	557
%	58	60	26	14	42

Таблица 4. Сравнение распределения данных о балле облачности от различных наблюдательных платформ по категориям

КН-04	КН-01			
	Ясно	Переменная облачность	Облачно	Всего (КН-04)
Ясно	475 (61 %)	69 (17 %)	37 (18 %)	581 (42 %)
Переменная облачность	272 (35 %)	211 (53 %)	54 (2 %)	537 (39 %)
Облачно	28 (4 %)	117 (29 %)	114 (56 %)	259 (19 %)
Всего (КН-01)	775 (56 %)	397 (29 %)	205 (15 %)	1377

Обеспеченность определения категорий облачности в табл. 4 показывает, насколько можно определить категорию облачности в точке расположения одного вида наблюдений (метеорологической станции) по данным наблюдений второго вида (данным радиозондирования). При этом необходимо учитывать, что расстояние между точками наблюдений иногда составляет до 1–3 км. Но даже если пункты наблюдений различных наблюдательных платформ совпадают по местоположению, то все равно данные по облачности могут отличаться хотя бы в силу различия наблюдательных приборов и за счет перемещения зонда с попутным ветром. Тем не менее обеспеченность определения категорий облачности в 90 и 83 % можно считать удовлетворительной, и в любом случае следует ориентироваться на эти данные в совокупности с данными табл. 1 при оценке качества прогноза балла облачности в пункте по данным численного моделирования.

3. Анализ качества прогнозов балла облачности по встроенной компоненте пост-процессинга UPP модели WRF-ARW

В качестве прогностических значений балла облачности в пункте принимаются значения в близлежащем узле прогностической сетки, полученные при расчетах постпроцессора UPP версии 2.2 модели WRF-ARW. Следует отметить, что устойчивого различия в характе-

ристиках качества прогноза балла облачности в пункте для данных из ближайшего узла сетки и проинтерполированных в пункт из четырех близлежащих узлов для достаточно большой выборки не обнаружено.

Качество прогнозов оценивалось по следующим характеристикам: U_k – оправдываемость прогноза категорий облачности, %; U (категория) – оправдываемость прогноза указанной категории облачности (%); P (категория) – предупрежденность указанной категории облачности, %; TSS (категория 1 / категория 2) – критерий Пирси–Обухова; $E_{ар}$ – средняя арифметическая ошибка прогноза (балл); $E_{абс}$ – средняя абсолютная ошибка прогноза (балл).

В табл. 5 приведен аналог таблицы сопряженности принятых категорий облачности, определенных по прогностическим данным UPP для общего балла облачности. В качестве фактических использовались данные наземных наблюдений в кодовой форме КН-01.

Таблица 5. Качество прогноза общего балла облачности заблаговременностью 12 ч по данным постпроцессинга UPP версии 2.2 модели WRF-ARW

КН-01	UPP (12 ч)			
	Ясно	Переменная облачность	Облачно	Всего (КН-01)
Ясно	38	597	1447	2082 (22 %)
Переменная облачность	26	569	1438	2033 (21 %)
Облачно	24	755	4599	5378 (57 %)
Всего (UPP)	88 (1 %)	1921 (20 %)	7484 (79 %)	9493

В табл. 5 представлены прогнозы, рассчитанные с заблаговременностью 12 ч от сроков наблюдений, так как это первая прогностическая заблаговременность, доступная синоптикам УГМС ДВ-региона. Более ранние заблаговременности не актуальны в силу наличия сроков отсечения, затрат времени на получение исходных данных для модели WRF-ARW «Хаб-15», доступность которых для скачивания наступает не ранее, чем через 3–4 ч от сроков наблюдений. Скачивание исходных данных Global Forecasting Model (NCEP) занимает около 1 часа. Время расчета прогноза, подготовки и доставки выходной продукции потребителю составляет около 4 часов [2]. Более поздние заблаговременности не приводятся: при анализе данных о качестве прогнозов элементов по рассматриваемой модели [3] выявлено, что качество всех элементов и явлений погоды падает с ростом заблаговременности и имеет суточный ход. Для прогноза балла облачности суточный ход оценок заметен только в теплый период года на послеполуденных (по местному времени) сроках, когда значительный вклад в общий балл дает конвективная облачность. Это заблаговременности 15, 18 и 21 ч для старта модели от срока

12 ч ВСВ и 27, 30 и 33 ч для старта модели от 00 ч ВСВ. Заблаговременности 3, 6 и 9 ч не рассматриваются по вышеизложенным причинам.

Таким образом, в табл. 5 представлены результаты сравнения прогностических и фактических данных по не конвективной облачности. Отметим, что качество прогнозов для заблаговременностей 12, 24 и 36 ч практически одинаково. Ухудшение характеристик качества становится заметно для более поздних заблаговременностей (48 ч и более).

Данные табл. 5 показывают, что поля общего балла облачности, рассчитанные UPP, практически не дают категории «ясно», несколько занижают частоту категории «переменная облачность» и существенно завышают частоту категории «облачно», т. е. прогностические поля общего балла облачности UPP показывают существенно более полное покрытие рассматриваемой территории облаками, чем данные наблюдений.

Анализ прогностических данных по ярусам представлен в табл. 6. Данные табл. 6 показывают, что наиболее близкое к фактическому распределение облачности по категориям дает прогноз UPP нижнего яруса. Средний ярус по UPP показывает более низкую частоту категории «облачно» и несколько более высокую частоту категорий «ясно» и «переменная облачность». Прогноз облачности верхнего яруса по UPP дает распределение облачности по категориям, противоречащее фактическому распределению, полученному как по выборке для сравнения данных наблюдений (табл. 2), так и по прогностической выборке, представленной в табл. 5. Таким образом, методология расчета балла облачности по данным модели WRF-ARW, представленная в UPP, не вполне адекватно описывает распределение облачности по категориям и ее вертикальную структуру. Прогноз общего балла облачности существенно завышает частоту категории «облачно» и занижает частоту категории «ясно», и это происходит не за счет верхнего яруса облачности, как получено по данным наблюдений. Прогностическое распределение верхнего яруса облачности по категориям совсем не соответствует реальным данным.

Таблица 6. Прогноз балла облачности по ярусам заблаговременностью 12 ч по данным постпроцессинга UPP версии 2.2 модели WRF-ARW

КН-01	UPP (12 ч)								
	Верхний ярус			Средний ярус			Нижний ярус		
	Ясно	Пер. обл.	Обл.	Ясно	Пер. обл.	Обл.	Ясно	Пер. обл.	Обл.
Ясно	1305	380	397	942	582	558	562	500	1020
Пер. обл.	1034	431	568	603	591	839	725	488	820
Облачно	2529	960	1889	1156	1136	3086	942	1085	3351
Всего (UPP, %)	54 %	19 %	31 %	28 %	24 %	47 %	23 %	22 %	55 %

Примечание. Пер. обл. – переменная облачность; обл. – облачно.

Анализ данных табл. 6 и выполненные расчеты характеристик качества прогнозов показали, что прогнозы балла облачности нижнего и среднего ярусов по UPP дают довольно близкое распределение общего балла облачности по категориям. Но в прогнозах нижнего яруса довольно большая часть фактических случаев «ясно» попадает в категорию «облачно». В прогнозах среднего яруса таких ошибок в два раза меньше, но здесь не хватает прогнозов «облачно» – большая часть случаев, относящихся по данным наблюдений к категории «облачно», попадает в категорию «ясно». Этот недостаток существенно меньше в прогнозах верхнего яруса: они дают высокую частоту класса «ясно», лишние случаи которого могут быть восполнены прогнозами среднего яруса, если придумать правило сборки прогнозов среднего и верхнего ярусов в общий балл облачности. Такая схема под названием «UPP-мод.» представлена в табл. 7.

Таблица 7. Определение общего балла облачности по среднему и верхнему ярусам по данным постпроцессинга UPP версии 2.2 модели WRF-ARW (схема «UPP-мод.»)

Верхний	Средний										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0		2	3	4	5	6	7	8	9	10
1			2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10
3	3	3	4	4	5	6	8	8	10	10	10
4	4	4	5	5	6	7	8	8	10	10	10
5	5	5	6	7	7	7	8	9	10	10	10
6	6	6	7	8	8	8	8	9	10	10	10
7	7	7	8	8	8	9	9	9	10	10	10
8	8	8	9	10	10	10	10	10	10		
9	9	9	10	10	10	10	10	10			
10	10	10	10	10	10	10	10	10			

В табл. 8 представлены характеристики качества деления фактической и прогностической выборок на категории для сравнения данных наблюдений от различных наблюдательных платформ и прогнозов. В верхней части таблицы приведены значения числовых характеристик качества альтернативного прогноза для явлений, принятые в метеорологической практике: U – оправдываемость альтернативного прогноза и TSS – критерий Пирси-Обухова для прогноза наличия или отсутствия явления. Значения этих характеристик, рассчитанные по данным наблюдений от различных наблюдательных платформ, выполненных в одном и том же пункте за одни и те же сроки, показывают верхнюю границу характеристик качества, которую возможно получить для данного вида прогноза. В нижней части таблицы приведены значения характеристик, рассчитанные по прогностической выборке для прогнозов заблаговременностью 12 ч. Это прогнозы облачности на сроки 00 и 12 ч ВСВ, что соответствует

интервалам 8–12 и 20–24 ч местного времени для Восточной Сибири и Дальнего Востока России (таким образом наличие конвективной облачности практически исключено).

Данные в последней строке табл. 8 относятся к расчету общего балла облачности по схеме «UPP-мод.», представленной в табл. 7. Из табл. 8 видно, что распределение прогностических данных общего балла облачности по категориям для схемы «UPP-мод.» существенно приблизилось к фактическому выборочному распределению и является лучшим наряду с распределением облачности нижнего яруса. При этом, оправдываемость альтернативного прогноза по категориям в целом (U_k) выше, чем для отдельных ярусов, хотя и несколько уступает аналогичному значению для общего балла облачности по методу, встроенному в UPP. То же показывают и остальные характеристики качества прогнозов. Хотя почти все оценки качества общего балла облачности по UPP несколько превышают или равны предложенному варианту «UPP-мод.», существенный перекося распределения прогнозов в сторону «облачно» за счет нижнего яруса нас не устраивает: по данным наблюдений не только частота категории «облачно» ниже, но и порядка 38 % случаев сплошной облачности формируется за счет верхнего яруса (согласно данным табл. 2).

Таблица 8. Характеристики качества разделения фактической и прогностической выборок с данными о балле облачности по категориям

Вид информации	Распределение по категориям (%)			Оправдываемость альтернативного прогноза (U , %)				Критерий Пирси-Обухова (TSS)		
	Ясно	Пер. обл.	Обл.	U_k	U_1	U_2	U_3	TSS ₁	TSS ₂	TSS ₃
Фактическая выборка										
Факт (КН-04), ниж. или сред. ярус	42	39	19	58	70	83	90	0,44	0,43	0,70
Факт (КН-01), ниж. или сред. ярус	56	29	15							
Факт (КН-01) общий балл	17	30	53	–	–	–	–	–	–	–
Прогностическая выборка (заблаговременность 12 ч)										
Факт (КН-01) общий балл	22	21	57	–	–	–	–	–	–	–
UPP общий балл	1	20	79	55	78	61	79	0,21	0,23	0,37
UPP верх. ярус	54	19	31	38	54	52	52	0,10	0,14	0,17
UPP сред. ярус	28	24	47	49	69	61	70	0,18	0,23	0,30
UPP ниж. ярус	23	22	55	46	66	59	67	0,04	0,33	0,14
UPP-мод.	21	19	59	51	73	61	72	0,22	0,19	0,27

Примечание. Пер. обл. – переменная облачность, обл. – облачно, ниж., сред. и верх. ярусы – соответственно нижний, средний или верхний ярусы облачности, UPP-мод. – модифицированная схема расчета общего балла облачности в соответствии с табл. 7. Нижние индексы: k – по всем категориям в целом, 1 – по категориям «ясно и переменная облачность» и «облачно», 2 – по категориям «ясно» и «переменная облачность и облачно», 3 – по категориям «ясно» и «облачно».

Эффективность предложенного подхода показана в табл. 9, где представлены оценки качества прогнозов общего балла облачности по методу UPP и схеме «UPP-мод.» для заблаговременностей на первые сутки прогноза.

Таблица 9. Оценки качества прогноза общего балла облачности, осредненные по 328 пунктам (наблюдений) ДВ-региона, за весь период испытаний

Забл. (ч.)	Характеристики качества прогнозов													
	N	N _я	N _п	N _о	U _к (%)	U (%)			P (%)			TSS	В баллах	
						Я	П	О	Я	П	О		E _{ар}	E _{абс}
UPP (общий балл)														
06	9566	1173	2316	6075	62	39	25	69	2	30	86	0,12	0,9	2,0
12	9493	2082	2033	5378	55	56	24	65	2	28	86	0,21	1,7	2,7
18	9423	2402	1716	5305	53	45	20	62	1	25	86	0,11	2,1	3,0
24	9326	1380	1858	6088	62	46	25	68	2	33	85	0,10	1,0	2,1
UPP-мод. (общий балл)														
06	9566	1173	2316	6075	57	38	20	71	39	22	71	0,20	-1,1	2,8
12	9493	2082	2033	5378	51	49	21	65	36	24	68	0,22	-0,2	3,3
18	9423	2402	1716	5305	50	44	20	63	34	21	65	0,19	-0,1	3,6
24	9326	1380	1858	6088	55	46	21	62	44	23	64	0,21	-1,5	3,3

Примечание. Забл. – заблаговременность прогноза; TSS – критерий Пирси-Обухова для классов «ясно» и «переменная облачность и облачно»; N – количество случаев; U – оправдываемость; P – предупрежденность; E_{ар}, E_{абс} – арифметическая и абсолютная ошибки прогнозов; Я, П, О – соответственно, категории «ясно», «переменная облачность» и «облачно». Индекс «к» – по всем категориям в целом.

Из табл. 9 видно существенное повышение предупрежденности категории «ясно» и критерия Пирси-Обухова при разделении классов «ясно» и «переменная облачность и облачно». При этом оправдываемость прогнозов категорий «ясно» и «облачно» практически не меняется. Несколько снижается оправдываемость прогнозов категории «переменная облачность», но это снижение несущественно на фоне в целом низкого качества прогнозов этой категории. Заметно, что UPP имеет систематическую погрешность прогноза положительного знака и завышает значение общего балла облачности. У схемы «UPP-мод» арифметическая погрешность имеет преимущественно отрицательное значение (занижает общий балл) и в среднем ниже, чем по UPP. Средняя абсолютная погрешность несколько выше, чем по UPP, но находится в пределах 90 % обеспеченности различий в данных об облачности, полученных от различных наблюдательных платформ.

В табл. 10 и 11 представлена детализация оценок качества прогнозов общего балла облачности по сезонам года по двум схемам: встроенной в UPP и модифицированной.

Таблица 10. Среднесезонные оценки качества прогноза общего балла облачности по схеме UPP, осредненные по 328 пунктам наблюдений ДВ-региона

Забл. (ч)	UPP (общий балл облачности)										
	N	N _я	N _п	N _о	U _к (%)	U (%)			TSS	В баллах	
						Я	П	О		E _{ар}	E _{абс}
ЗИМА											
06	2311	544	597	1170	53	50	20	62	0,27	2,2	2,7
12	2328	790	448	1090	49	69	16	60	0,35	3,2	3,6
18	2276	912	342	1022	45	60	12	62	0,20	3,7	4,0
24	2055	518	448	1089	54	70	21	62	0,45	2,3	2,9
ВЕСНА											
06	2526	302	665	1559	62	41	21	67	0,29	1,1	2,0
12	2520	667	600	1253	50	56	21	62	0,30	2,3	3,1
18	2564	760	552	1252	48	44	18	61	0,14	2,8	3,4
24	2582	470	529	1583	61	43	23	65	0,25	1,5	2,3
ЛЕТО											
06	1964	81	503	1380	63	7	35	71	0,03	-0,3	1,8
12	2044	188	491	1365	61	15	35	66	0,06	0,1	2,0
18	1993	239	272	1381	62	13	30	58	0,19	0,3	2,2
24	2028	125	291	1512	67	13	40	73	0,07	-0,4	1,8
ОСЕНЬ											
06	2765	246	553	1966	70	24	27	78	0,16	0,6	1,6
12	2601	437	494	1670	63	48	26	71	0,32	1,1	2,1
18	2590	491	449	1650	61	33	26	65	0,15	1,3	2,4
24	2661	267	490	1904	69	18	26	76	0,08	0,6	1,7

Примечание. Забл. – заблаговременность прогноза; TSS – критерий Пирси-Обухова для классов «ясно» и «переменная облачность и облачно»; N – количество случаев; U – оправдываемость; E_{ар}, E_{абс} – арифметическая и абсолютная ошибки прогнозов; Я, П, О – соответственно. категории «ясно», «переменная облачность» и «облачно». Индекс «к» – по всем категориям в целом

Данные табл. 10 и 11 показывают выраженный сезонный ход значений оправдываемости прогноза категории «ясно» и критерия Пирси-Обухова при разделении категорий «ясно» и «переменная облачность и облачно»: более высокое качество наблюдается зимой, снижение характеристик качества происходит весной, минимальные значения – летом и последующий рост осенью. В то же время самое низкое качество деления выборки на категории наблюдается зимой, а самое высокое – летом и осенью, что связано с более низкой частотой

категории «ясно» в эти сезоны года. Средняя арифметическая и средняя абсолютная погрешности наиболее высоки зимой и минимальны летом. Заметен сезонный ход оправдываемости прогноза категории «переменная облачность»: он менее ярко выражен, но существен. Здесь минимальные значения оправдываемости наблюдаются зимой, а максимальные – летом. В любом случае значения оправдываемости прогнозов категорий коррелируют с частотой появления соответствующей категории в испытываемой выборке.

Таблица 11. Среднесезонные оценки качества прогноза общего балла облачности по модифицированной схеме UPP, осредненные по 328 пунктам наблюдений ДВ-региона

Забл. (ч)	UPP модифицированный (общий балл облачности)										
	N	N _я	N _п	N _о	U _к (%)	U (%)			TSS	В баллах	
						Я	П	О		E _{ар}	E _{абс}
ЗИМА											
06	2311	544	597	1170	51	48	16	62	0,32	-1,3	3,3
12	2328	790	448	1090	51	60	13	60	0,38	-0,1	3,5
18	2276	912	342	1022	53	61	11	62	0,32	0,6	3,6
24	2055	518	448	1089	48	69	18	52	0,30	-1,3	3,8
ВЕСНА											
06	2526	302	665	1559	52	43	15	67	0,32	-1,6	3,1
12	2520	667	600	1253	46	48	16	62	0,23	0,1	3,5
18	2564	760	552	1252	49	43	15	61	0,18	0,1	3,7
24	2582	470	529	1583	55	44	17	65	0,31	-1,3	3,1
ЛЕТО											
06	1964	81	503	1380	56	10	30	71	0,10	-0,9	2,5
12	2044	188	491	1365	50	10	31	66	0,17	-0,5	2,9
18	1993	239	373	1381	49	13	28	63	0,22	-0,8	3,5
24	2028	125	391	1512	52	12	36	61	0,16	-2,0	3,3
ОСЕНЬ											
06	2765	246	553	1966	62	22	21	78	0,20	-0,8	2,4
12	2601	437	494	1670	53	42	22	71	0,26	-0,2	3,3
18	2590	491	449	1650	49	32	21	65	0,23	-0,5	3,6
24	2661	267	490	1904	58	19	28	66	0,22	-1,4	2,9

Примечание. Забл. – заблаговременность прогноза; TSS – критерий Пирси-Обухова для классов «ясно» и «переменная облачность и облачно»; N – количество случаев; U – оправдываемость; E_{ар}, E_{абс} – арифметическая и абсолютная ошибки прогнозов; Я, П, О – соответственно, категории «ясно», «переменная облачность» и «облачно». Индекс «к» – по всем категориям в целом.

В целом данные, представленные в табл. 9–11, показывают определенное преимущество модифицированной схемы прогноза общего балла облачности в сравнении со встроенной в UPP схемой, особенно с учетом распределения наблюдаемых данных об облачности по высотам на рассматриваемой территории – существенным вкладом облачности верхнего яруса в категорию «облачно», которая сама по себе редко связана с осадками и мало влияет на радиационные процессы на территории Дальнего Востока, но при этом дает существенный вклад в данные наблюдений по общему баллу облачности.

В связи с вышеизложенным рекомендуется для прогноза общего балла облачности использовать модифицированную схему UPP.

Прогнозы балла облачности нижнего и среднего ярусов можно считать удовлетворительными.

Для построения карт полей облачности, особенно совмещенных с полями осадков, на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока рекомендуется использовать прогнозы облачности нижнего яруса по схеме UPP.

Для повышения качества прогнозов балла облачности необходим переход к более детальному пространственному разрешению и создание отдельного метода прогнозирования конвективной облачности.

4. Решение ЦМКП Росгидромета

ЦМКП одобрило работу ФГБУ «ДВНИГМИ» по разработке оперативной технологии расчета полей балла облачности по территории Восточной Сибири и Дальнего Востока по модели WRF-ARW с горизонтальным шагом 15 км и разработке технологии расчета оценок качества прогнозов и анализу особенностей распределения балла облачности по категориям и ярусам по данным от различных наблюдательных платформ. Рассмотрев результаты испытаний различных версий метода расчета балла облачности по выходной продукции модели WRF-ARW.

ЦМКП рекомендовала:

– прогнозы полей *общего балла* облачности по модифицированной схеме UPP и облачности *нижнего яруса* по встроенной схеме UPP, а также прогнозы общего балла облачности в пунктах рекомендовать к использованию в оперативной практике УГМС ДВ-региона России в качестве вспомогательного метода;

– прогнозы полей *среднего яруса* использовать в качестве консультативного материала;

– авторам учесть высказанные на заседании замечания и предложения, а также пожелания специалистов прогностических подразделений ФГБУ «Дальневосточное УГМС» по совершенствованию методов прогноза балла облачности в ДВ-регионе.

Список литературы

1. *Вербицкая Е.М., Романский С.О.* Метод прогноза балла облачности в рамках региональной гидродинамической модели для территории Дальневосточного региона России // Труды ДВНИГМИ. – 2012. – Вып. 154. – С. 5-21.

2. *Вербицкая Е.М., Романский С.О.* Применение высокопроизводительных систем для численного прогноза погоды в Дальневосточном регионе России // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2015. – № 3. – С. 131-140.

3. *Вербицкая Е.М., Романский С.О.* Результаты испытаний краткосрочных оперативных прогнозов мезомасштабной модели WRF-ARW «Хаб-15» в пунктах Дальневосточного региона России // Информационный сборник № 43 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2016. – С. 32–62.

4. Конфигурация модели WRF-ARW для подготовки детализированных численных прогнозов погоды и опасных метеорологических явлений в Дальневосточном регионе. Отчет о НИР (заключ.): 1.1.1.6 / ДВНИГМИ ; рук. Е.М. Вербицкая; исполн.: С.О. Романский. – Хабаровск, 2013. – 73 с.

5. РД 52.88.629-2002. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009. – 66 с.

6. РД 52.27.284–91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиофизических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 150 с.

7. Физико-статистические компоненты прогноза элементов и явлений погоды в пунктах и на территории Дальневосточного региона для двух версий региональной гидродинамической квазигидростатической модели краткосрочного прогноза полей метеоэлементов и осадков ГМЦ РФ (автор В.М. Лосев). Отчет о НИР (заключ.) : 1.2.1. п.5 / ДВНИГМИ; рук. Е. М. Вербицкая; исполн.: С.О. Романский, И.В. Бобрикова, Л.С. Мякина. – Хабаровск, 2010. – 94 с.

8. *Auligne T., Lorenc A., Michel Y., Montmerle T., Jones A., Hu M., Dudhia J.* Toward a new cloud analysis and prediction system // Bulletin of the American meteorological society – 2011. – No. 2. – P. 207–210.

9. *Hong S.-Y., Dudhia J., Chen S.-H.* A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation // *Mon. Wea. Rev.* – 2004. – Vol. 132. – P. 103-120.

10. *Moorthi S., Pan H.-L., Caplan P.* Changes to the 2001 NCEP operational MRF/AVN global analysis/forecast system // *NWS technical procedures bulletin.* – 2001. – No. 484. – 14 p. Режим доступа: <http://www.nws.noaa.gov/om/tpb/484.htm> (Дата обращения: 11.07.2017).

11. *Thompson G., Field P., Rasmussen R., Hall D.* Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: implementation of a new snow parameterization // *Mon. Wea. Rev.* – 2008. – Vol. 136. – P. 5095-5115.

12. *Van der Veen S.H.* Improving NWP model cloud forecasts using Meteosat second-generation imagery // *Mon. Wea. Rev.* – 2013. – Vol. 141. – P. 1545-1957.

13. *WRF-ARW user's guide v. 3.4.* – Boulder: NCAR, 2013. – 384 p. – Режим доступа: http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3.4/ARWUsersGuideV3.4.pdf (Дата обращения: 11.07.2017).

14. *Zhao Q., Carr F.H.* A prognostic cloud scheme for operational NWP models // *Mon. Wea. Rev.* – 1997. – Vol. 125. – P. 1931-1953.

*В.М. Токарев, М.Я. Здерева, Н.А. Хлучина,
Л.П. Воробьева, Н.А. Бабошина*

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ НОВОЙ ОПЕРАТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОГНОЗА ГРОЗ

Введение

Автоматизированная технология прогноза гроз на 1–3 сутки (12–72 часов) на базе модельной продукции COSMO-Ru_Sib и GFS (NCEP) была разработана в рамках выполнения темы 1.1.1.2. Плана НИР Росгидромета на 2014–2016 гг. На основании решения секции Технического Совета ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» (ЗС УГМС) от 22.11.2016 г. в Гидрометцентре УГМС были проведены оперативные испытания метода, выполнена оценка качества прогноза гроз, определена возможность использования нового метода в оперативной работе Гидрометцентра и прогностических подразделений Управления.

Методы прогноза гроз постепенно трансформировались от синоптического анализа прошедшей погоды к расчетам по аэрологической диаграмме последнего срока зондирования в ближайшем пункте. Такая технология объективно ограничивала прогностические возможности привязкой к довольно редкой сети аэрологических станций и необходимостью индивидуальной подстройки методов для отдельных населенных пунктов и территорий. Заблаговременность прогнозов не превышала 12 часов, а расчеты обычно сводились к вычислению какого-либо из разработанных для определенных территорий "индексов" гроз [6], представляющих из себя комбинации различных гидротермических характеристик вертикального профиля тропосферы.

С повышением качества и детальности прогностических полей гидродинамических моделей появилась возможность увеличить заблаговременность прогнозов и снять зависимость от редкой сети зондирования. Теперь на выходе многих моделей уже имеются не только значения гидротермических характеристик по уровням, но и готовые расчеты популярных грозовых «индексов» [1]. Однако использовать их непосредственно для прогнозов не так просто.

Фактически, задача выбора лучшего индекса и его оптимальных пороговых значений для отдельных территорий перекладывается на методическую группу составителей прогнозов. А поскольку еще и абсолютно универсального критерия качества бинарных прогнозов

не существует, то текущую ситуацию с выбором оперативной методики следует признать тупиковой.

Предлагаемая методика, базирующаяся на построении индивидуальных прогностических решающих правил для каждого пункта сети ГМС, направлена на решение указанных проблем для прогнозистов.

Логические деревья решений представляются наиболее естественной формой исследования, анализа и применения в прогнозе бинарных или сводимых к бинарным ситуаций и явлений погоды [2]. Но в достаточно простой схеме получения дерева решений есть два ключевых момента, которые, скорее всего, и препятствовали их широкому использованию для разработки прогнозов:

- критерий разделения ветвей по категориям (да/нет);
- единый критерий для сравнения качества прогнозов (оценивающий одновременно оправдываемость и предупрежденность) в процессе построения дерева решений.

Именно эти два критерия определяют конечный результат.

1. Ключевые моменты методики построения решений

1.1. Предиктант

В качестве базовой фактической информации использованы результаты наблюдений на сети наземных синоптических станций, находящихся на территории от Урала до Якутии – 430 станций. В сводках КН-01 выделены коды гроз в срок и в течение часа до срока наблюдения, а также между сроками наблюдений.

Для регуляции вероятности явления и повышения устойчивости решений определены варианты кластеризации явлений по пространству, включающие наличие явления непосредственно в радиусе наблюдения (примерно 10 км) и в радиусах 50, 100 и 150 км. К ним добавлены варианты, учитывающие временной интервал, продолжительность гроз и массовость в пределах заданного радиуса. Всего бинарные деревья построены по 30 вариантам для каждой станции. Разница между вариантами с минимальной и максимальной вероятностями явления составляет в среднем от 5 до 15 %, а по станциям – от менее 1 до 50 %, что позволяет пользователю выбирать варианты с различной детализацией или точностью и надежностью прогнозов.

Для оперативных испытаний методики и оценки методических прогнозов в ЗС УГМС использовались три варианта представления предиктанта: в радиусах 0, 50 и 100 км (табл. 1). Для сравнения будут приведены результаты и по вариантам в радиусе 150 км: с массовыми

грозами (вариант 5 – грозы на более четверти территории кластера) и любыми, включая одиночные (вариант 4).

Таблица 1. Варианты представления предиктанта для получения прогностических решений и оценок прогнозов. Грозы в срок или между сроками (по коду КН-01)

№	Радиус, км	Количество станций с грозой
1	R0	одна
2	R50	хотя бы одна
3	R100	хотя бы одна
4	R150	хотя бы одна
5	R150	>25%

1.2. Предикторы

Технология СибНИГМИ опирается на набор выходных прогностических полей моделей COSMO-Ru_Sib с разрешением 13 км и GFS (NCEP) с разрешением 0,5°. Кроме параметров атмосферы, на стандартных изобарических уровнях использовались вертикальные и горизонтальные градиенты температуры, влажности, ветра, расчетные значения потенциальной температуры и температуры смоченного термометра, значения высоты нулевой изотермы, давления на уровнях тропопаузы, параметров конвекции, шесть наиболее популярных «индексов» гроз. Первоначальный список составлял порядка ста базовых параметров, которые в дальнейшем просеивались. В итоге предварительного анализа оставлено 44 параметра-признака, число которых удвоено для 12-часового интервала за счет добавления модельных данных в промежуточном сроке. Это не означает, что в построенных деревьях будут находиться все заданные параметры, алгоритм сам определяет наиболее значимые для разделения конкретной выборки с ситуациями двух классов. По повторяемости признаков в полученных решениях можно судить об их значимости для оценки грозовых ситуаций. Показатели конвективной неустойчивости, такие как Ki (индекс Вайтинга), Total Totals (ТТ), SWEAT, Li, CAPE, JEFF (индекс Джефферсона), подтвердили обоснованность их учета. Не менее важны такие параметры, как температура смоченного термометра на уровне АТ-850 (Tsm850), температура точки росы у Земли (Td0), ее горизонтальные градиенты на разных уровнях (dTd), вертикальные градиенты псевдопотенциальной (Tps) температуры.

Обучающие выборки построены для каждой станции региона по каждому варианту представления факта грозы и для каждого прогностического срока через 6 и 12 часов. Период рабочей выборки составил три года с 2014 по 2016 год. Решения получены отдельно по моделям COSMO-Ru_Sib и GFS (NCEP).

1.3. Критерии построения решений

Логическое решающее правило строится путем рекурсивного перебора значений исходных признаков с нахождением оптимального значения для наилучшего разделения исходной вероятности образа по двум классам. Процесс повторяется последовательно на каждой полученной ветке, формируя в итоге логическое дерево.

Критерий TSS Пирси-Обухова (1) оказался подходящим для разделения ветвей дерева решений, но не для оценки качества прогнозов по таблице сопряженности.

Далее будем использовать обозначения различных оценочных характеристик таблицы сопряженности бинарных (да/нет) прогнозов (табл. 2).

Таблица 2. Матрица сопряженности бинарных (да/нет) прогнозов

Прогноз	Факт		Сумма
	да	нет	
да	k11	k12	П+
нет	k21	k22	П-
Сумма	Ф+	Ф-	k00

где:

k11, k12, k21, k22 – числа совпадений двух категорий (да/нет) прогнозов и фактов;

П+ – число прогнозов "да";

П- – число прогнозов "нет";

Ф+ – число фактических случаев "да";

Ф- – число фактических случаев "нет";

k00 – суммарное число фактических случаев = количеству прогнозов.

Расчетные оценки качества прогнозов по таблице сопряженности:

O+, O- – оправдываемость прогнозов П+, П-;

ОО – оправдываемость всех прогнозов;

P+, P- – предупрежденность фактов Ф+, Ф-;

ФФ+ = $(\Phi+ / k00) \cdot 100$ – фактическая вероятность наблюдаемых явлений, %;

ПП+ = $(\Pi+ / k00) \cdot 100$ – относительное число прогнозов с явлением, %;

T – критерий Пирси-Обухова (-1 ...+1): $T = k11 / (\Phi+) - k12/(\Phi-)$. 1)

Для отнесения ветвей дерева к одному из двух прогностических классов и сравнения вариантов деревьев в целом, авторами предложен критерий **prv** (2) баланса предупрежденности прогноза явления "P+" и его прогностической вероятности, равной "O+" – оправдываемости прогнозов "П+":

prv – (В.М. Токарев) смещенный критерий баланса (0 ... 1):

$$\text{prv}(P+ \geq O+) = 0.3 \cdot (P+) + 0.7 \cdot (O+),$$

$$\text{prv}(P+ < O+) = 0.9 \cdot (P+) + 0.1 \cdot (O+). \quad (2)$$

Оправдываемость прогнозов с явлением ($O+$, %) – это интерпретация прогностической вероятности явления, которая находится в противофазе с предупреденностью ($P+$, %). Это проявляется, например, при выборе (смещении) порогового значения для «индексов» гроз. Критерий **prv** стремится одновременно максимизировать предупреденность явления и его прогностическую вероятность, но с небольшим приоритетом предупреденности («перестраховка» для опасных явлений). Принципиальное различие критериев "Т" и "prv" видно на двух примерах парных сравнений из таблиц результатов оперативных испытаний (табл. 3). Ниже приведены полученные «деревья» (методы) для заданного варианта первой сравниваемой пары – Новосибирск (рис. 1) и Томск (рис. 2). Если исходные значения признаков приводят к конечной ветке «да», дается прогноз наличия явления, соответственно, «нет» – его отсутствия.

Таблица 3. Сравнение критериев Т и prv на конкретных примерах матриц сопряженности

Пункт	Матрица сопряженности					Оценки в %							Т	prv
	k11	k12	k21	k22	k00	O+	O-	OO	P+	P-	ФФ+	ПП+		
Пример 1. Вариант R0 – прогноз грозы на станции														
Томск	10	11	14	106	141	48	88	82	42	91	17	15	0,32	0,46
Новосибирск	11	36	4	90	141	23	96	72	73	71	11	33	0,45	0,38
Пример 2. Вариант R50 – гроза хотя бы на одной станции в радиусе 50 км														
Кемерово	25	23	15	89	152	52	86	75	63	79	26	32	0,42	0,55
Барнаул	12	34	2	104	152	26	98	76	86	75	9	30	0,61	0,44

Из таблицы оценок для приведенных примеров (табл. 3) видно, что критерий Т игнорирует разбалансировку предупреденности ($P+$) и прогностической вероятности явления ($O+$). Так, в примере 1 критерий Т дает существенное преимущество решающему правилу (методу прогноза) Новосибирска (0,45) против Томска (0,32). И это несмотря на трехкратное превышение предупреденности (73 %) над недопустимо низкой прогностической вероятностью (оправдываемостью) явления (23 %). Критерий prv отдает преимущество Томску (0,46 против 0,32), у которого предупреденность и вероятность почти сбалансированы (42 % и 48 %). В примере 2 разбалансировка для Кемерово еще сильнее (86 %, 26 %), но критерий Т превосходит (0,61 против 0,42) намного более сбалансированное решение для Новосибирска (63 %, 52 %). По критерию prv сравнение дает противоположный результат (0,4 против 0,55).

Таким образом, использование в алгоритме критерия Пирси-Обухова привело бы к построению «смещенных» решений. «Критерий баланса» можно использовать как для выбора

оптимальных ветвей дерева решений, так и для автоматического сравнения качества любых прогностических методик.

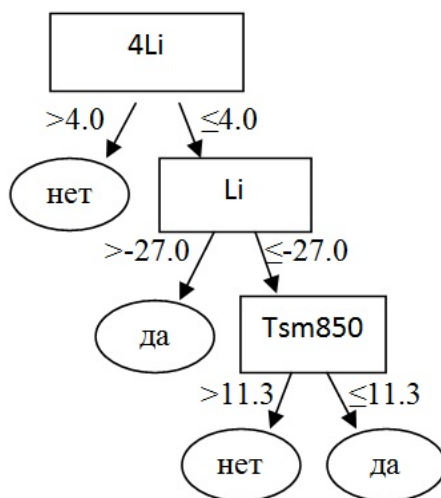


Рис. 1. Решение для прогноза гроз по модели GFS(NCEP) на 54 ч. Метеостанция Новосибирск (индекс 29637). Вариант R0.

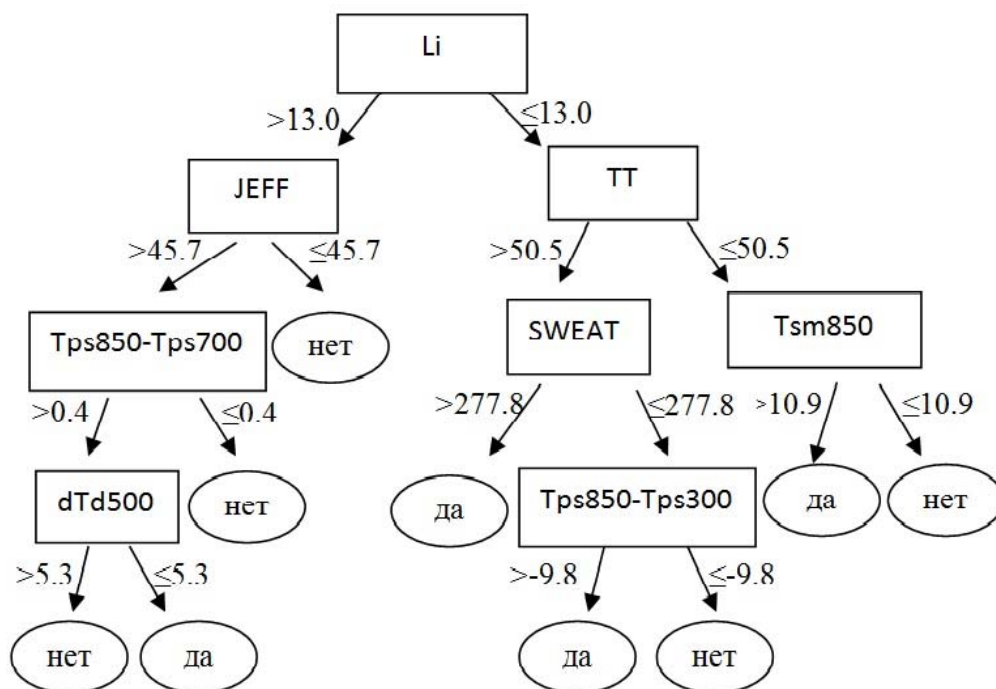


Рис. 2. Решение для прогноза гроз по модели GFS(NCEP) на 54 ч. Метеостанция Томск (индекс 29430). Вариант R0.

2. Результаты испытаний технологии

Программное обеспечение для восстановления решений по полученным деревьям реализовано в автоматизированной технологии получения прогноза гроз на 1–3 сутки.

Для верификации автоматизированные прогнозы составлялись ежедневно в оперативном режиме сразу после готовности модельных выпусков COSMO-Ru_SIB и GFS(NCEP) за 00 и 12 ч ВСВ. Уже на этапе авторских испытаний прогнозы на базе GFS показали более высокое качество, вот почему именно они участвовали в производственных испытаниях.

По территории ответственности ЗС УГМС к оценке привлекались все станции Томской, Кемеровской, Новосибирской областей, Алтайского края и Республики Алтай (всего 121 станция). Отдельно протестированы решения, интересующие оперативные подразделения, – прогнозы по административным центрам указанных территорий. В соответствии с утвержденной программой анализ результатов проводился в отделе метеорологических прогнозов погоды Гидрометцентра ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» в период с мая по сентябрь 2017 года. В качестве фактических данных использовались наблюдения по грозам по станциям региона, поступающие по каналам связи в коде КН-01. Дополнительно специалистами Гидрометцентра и филиалов ЗС УГМС для оценки прогнозов гроз по областным центрам привлекались данные МРЛ.

Автоматизированная оценка методических прогнозов входит в часть разработанной технологии. Алгоритмы оценок соответствуют предложенным в методических указаниях по проведению испытаний [3]. Согласно программе испытания анализ качества прогнозов гроз по территории проводился для вариантов гроз в радиусах 0 и 100 км (варианты 1 и 3), а для административных центров – в радиусах 0 и 50 км (варианты 1–2). Заблаговременность прогнозов 1–2 сутки (12–60 ч).

Табл. 4 и 5 представляют строгие оценки по каждому пункту, объединенные затем по административным областям. Видно, что качество прогнозов слабо зависит от заблаговременности, но отличается по полусуткам. Прогнозы гроз на день как оправдываются, так и предупреждаются на 10–15 % лучше по сравнению с ночными.

Оправдываемость прогнозов по решениям R100 (табл. 5) в среднем на 20 % лучше, чем по варианту R0, при этом предупрежденность гроз также возрастает на 8–12 % днем и до +20 % ночью.

Для варианта 1 (табл. 4) по территории наиболее низкие оценки прогнозов ночных гроз по Новосибирской области, наиболее сбалансированные – по Республике Алтай. Прогноз дневных гроз показал более ровное распределение качества по территории, при этом и критерий Пирси-Обухова, и критерий баланса prv выше 0,4. С переходом на кластеры 100 км оба критерия возрастают более чем на 0,1. Наиболее сбалансированные по предупрежденности и точности прогнозы в Кемеровской области ($prv = 0,69$ днем) и республике Алтай, наиболее низкие показатели для Томской и Новосибирской областей.

Таблица 4. Суммарные оценки по станциям областей. Вариант R0 – прогноз грозы на станции. Май – сентябрь 2017 г.

Область	Матрица сопряженности					Оценки в %							T	prv
	k11	k12	k21	k22	k00	O+	O-	OO	P+	P-	ФФ+	ФП+		
00+18ч (ночь 1)														
Томская	177	420	165	2614	3376	30	94	83	52	86	10	18	0,38	0,36
Новосибирская	216	681	320	4035	5252	24	93	81	40	86	10	17	0,26	0,29
Кемеровская	178	366	146	2160	2850	33	94	82	55	86	11	19	0,40	0,39
Республика Алтай	104	274	56	1162	1596	28	95	79	65	81	10	24	0,46	0,39
Алтай	277	636	240	3286	4439	30	93	80	54	84	12	21	0,37	0,37
00+42ч (ночь 2)														
Томская	162	384	174	2553	3273	30	94	83	48	87	10	17	0,35	0,35
Новосибирская	230	761	285	3833	5109	23	93	80	45	83	10	19	0,28	0,30
Кемеровская	171	472	138	1993	2774	27	94	78	55	81	11	23	0,36	0,35
Республика Алтай	86	163	61	1126	1436	35	95	84	59	87	10	17	0,46	0,42
Алтай	292	751	221	3035	4299	28	93	77	57	80	12	24	0,37	0,37
00+30ч (день 1)														
Томская	271	332	189	2529	3321	45	93	84	59	88	14	18	0,47	0,49
Новосибирская	426	848	224	3573	5071	33	94	79	66	81	13	25	0,46	0,43
Кемеровская	345	582	120	1690	2737	37	93	74	74	74	17	34	0,49	0,48
Республика Алтай	154	252	77	898	1381	38	92	76	67	78	17	29	0,45	0,47
Алтай	443	637	209	3079	4368	41	94	81	68	83	15	25	0,51	0,49
00+54ч (день 2)														
Томская	259	387	212	2372	3230	40	92	81	55	86	15	20	0,41	0,45
Новосибирская	440	896	225	3290	4851	33	94	77	66	79	14	28	0,45	0,43
Кемеровская	241	504	115	1719	2579	32	94	76	68	77	14	29	0,45	0,43
Респ. Алтай	160	265	67	913	1405	38	93	76	70	78	16	30	0,48	0,47
Алтай	405	705	209	2783	4102	36	93	78	66	80	15	27	0,46	0,45

Таблица 5. Суммарные оценки по станциям областей. Вариант R100 – гроза хотя бы на одной станции в радиусе 100 км. Май – сентябрь 2017 г.

Область	Матрица сопряженности					Оценки в %							T	prv
	k11	k12	k21	k22	k00	O+	O-	OO	P+	P-	ФФ+	ПП+		
00+18ч (ночь 1)														
Томская	342	419	226	2460	3447	45	92	81	60	85	16	22	0,46	0,50
Новосибирская	822	834	520	3077	5253	50	86	74	61	79	26	32	0,40	-0,53
Кемеровская	643	426	245	1686	3000	60	87	78	72	80	30	36	0,52	0,64
Республика Алтай	231	201	124	1013	1569	53	89	79	65	83	23	28	0,49	0,57
Алтай	894	706	404	2691	4695	56	87	76	69	79	28	34	0,48	0,60
00+42ч (ночь 2)														
Томская	316	428	245	2352	3341	42	91	80	56	85	17	22	0,41	0,47
Новосибирская	844	902	442	2922	5110	48	87	74	66	76	25	34	0,42	0,54
Кемеровская	549	443	302	1626	2920	55	84	74	65	79	29	34	0,43	0,58
Республика Алтай	225	214	135	979	1553	51	88	78	63	82	23	28	0,45	0,55
Алтай	755	592	485	2620	4452	56	84	76	61	82	28	30	0,42	0,58

00+30ч (день 1)														
Томская	459	365	234	2227	3285	56	90	82	66	86	21	25	0,52	0,59
Новосибирская	996	824	337	2917	5074	55	90	77	75	78	26	36	0,53	0,61
Кемеровская	777	412	212	1499	2900	65	88	78	79	78	34	41	0,57	0,69
Республика Алтай	289	148	136	795	1368	66	85	79	68	84	31	32	0,52	0,67
Алтай	940	560	339	2292	4131	63	87	78	73	80	31	36	0,54	0,66
00+54ч (день 2)														
Томская	462	447	240	2094	3243	51	90	79	66	82	22	28	0,48	0,55
Новосибирская	926	750	408	2851	4935	55	87	77	69	79	27	34	0,49	0,60
Кемеровская	751	423	198	1448	2820	64	88	78	79	77	34	42	0,57	0,69
Республика Алтай	277	181	147	793	1398	60	84	77	65	81	30	33	0,47	0,62
Алтай	979	576	304	2423	4282	63	89	79	76	81	30	36	0,57	0,67

Прогнозы по пяти рассмотренным центрам (табл. 6–8) показывают более неустойчивые результаты по заблаговременностям. Так, оценки между первой и второй ночью в радиусе 0 км (табл. 6) меняются как в одну, так и в другую сторону. Особенно выделилось Кемерово, в первую ночь имевшее наиболее высокие критерии Пирси-Обухова и **prv**, во вторую – практически лишь один оправданный прогноз с явлением. Отметим, что при этом в процентном отношении число фактических (Ф+) и прогностических гроз (П+) во всей выборке примерно одинаковое (8:11). Анализ июльских случаев показал, что в Кемерово было наблюдаемо всего три грозы, прогноз давал шесть, три из них буквально были зафиксированы в соседнем сроке, на границе полусуток, и потому не попали в плюс. Прогнозы дневных гроз в большинстве случаев более точны на первый день, например, в Новосибирске критерий Пирси-Обухова достигает 0,65 при хорошем показателе баланса оценок (**prv** = 0,50).

Для сравнения приведены оценки для вариантов в кластере 150 км, когда гроза наблюдалась хотя бы на одной станции (табл. 7) и на более четверти станций в кластере (табл. 8) для тех же административных центров. Ожидаемо все показатели качества существенно возросли. Критерий **prv** выше 0,60 на ночь и выше 0,70 на день.

Особый интерес на наш взгляд представляет прогноз "массовых" гроз (табл. 8) с высокой предупрежденностью (до 70 % ночью и до 80 % днем) при удовлетворительном проценте ложных тревог.

Прогностическим подразделением Гидрометцентра ЗС УГМС проведен сравнительный анализ методических прогнозов гроз с оперативными прогнозами на первые сутки, составленными синоптиками. При этом автоматизированный методический прогноз, представленный по станциям, как бы переводился в синоптический в принятой терминологии согласно «Наставлению по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения» [4]. В случае прогноза гроз «местами» по территории, оправдываемость составит 100 %, если хотя бы одна станция зафиксировала грозу, но не более половины всех станций.

Таблица 6. Оценки прогнозов по центрам областей. Вариант R0 – прогноз грозы на станции. Май – сентябрь 2017 г.

Пункт	Матрица сопряженности					Оценки в %							T	prv
	k11	k12	k21	k22	k00	O+	O-	OO	P+	P-	ФФ+	ПП+		
00+18ч (ночь 1)														
Томск	7	16	12	115	150	30	91	81	37	88	13	15	0,25	0,32
Новосибирск	9	24	7	110	150	27	94	79	56	82	11	22	0,38	0,36
Кемерово	6	11	5	128	150	35	96	89	55	92	7	11	0,47	0,41
Кызыл-Озек	6	12	11	121	150	33	92	85	35	91	11	12	0,26	0,34
Барнаул	8	24	10	108	150	25	92	77	44	82	12	21	0,26	0,31
00+42ч (ночь 2)														
Томск	10	26	8	102	146	28	93	77	56	80	12	25	0,35	0,36
Новосибирск	5	12	9	120	146	29	93	86	36	91	10	12	0,27	0,31
Кемерово	1	15	10	120	146	6	92	83	9	89	8	11	-0,022	0,07
Кызыл-Озек	5	13	3	42	63	28	93	75	63	76	13	29	0,39	0,38
Барнаул	13	42	3	88	146	24	97	69	81	68	11	38	0,49	0,41
00+30ч (день 1)														
Томск	9	16	15	105	145	36	88	79	38	87	17	17	0,24	0,36
Новосибирск	11	18	3	113	145	38	97	86	79	86	10	20	0,65	0,50
Кемерово	17	40	2	86	145	30	98	71	89	68	13	39	0,58	0,48
Кызыл-Озек	19	25	8	93	145	43	92	77	70	79	19	30	0,49	0,51
Барнаул	16	31	4	94	145	34	96	76	80	75	14	32	0,55	0,48
00+54ч (день 2)														
Томск	10	11	14	106	141	48	88	82	42	91	17	15	0,32	0,46
Новосибирск	11	36	4	90	141	23	96	72	73	71	11	33	0,45	0,38
Кемерово	10	26	8	7	141	28	92	76	56	79	13	26	0,34	0,36
Кызыл-Озек	12	31	8	66	117	28	89	67	60	68	17	37	0,28	0,38
Барнаул	11	20	9	101	141	35	92	79	55	83	14	22	0,38	0,41

Таблица 7. Оценки прогнозов по центрам областей. Вариант R150 – гроза хотя бы на одной станции в радиусе 150 км. Май – сентябрь 2017 г.

Пункт	Матрица сопряженности					Оценки в %							T	prv
	k11	k12	k21	k22	k00	O+	O-	OO	P+	P-	ФФ+	ПП+		
00+18ч (ночь 1)														
Томск	25	17	19	59	120	60	76	70	57	78	37	35	0,34	0,59
Новосибирск	41	30	8	66	145	58	89	74	84	69	34	49	0,52	0,66
Кемерово	48	18	8	71	145	73	90	82	86	80	39	46	0,65	0,77
Кызыл-Озек	32	23	17	54	126	58	76	68	65	70	39	44	0,35	0,60
Барнаул	38	20	14	73	145	66	84	77	73	78	36	40	0,52	0,68
00+42ч (ночь 2)														
Томск	25	12	20	83	140	68	81	77	56	87	32	26	0,43	0,64
Новосибирск	35	25	12	67	139	58	85	73	74	73	34	43	0,47	0,63
Кемерово	38	19	15	67	139	67	82	76	72	78	38	41	0,50	0,68
Кызыл-Озек	32	18	23	66	139	64	74	71	58	79	40	36	0,37	0,62
Барнаул	40	30	10	59	139	57	86	71	80	66	36	50	0,46	0,64

00+30ч (день 1)														
Томск	36	18	12	75	141	67	86	79	75	81	34	38	0,56	0,69
Новосибирск	37	20	10	74	141	65	88	79	79	79	33	40	0,57	0,69
Кемерово	41	16	15	68	140	72	82	78	73	81	40	41	0,54	0,72
Кызыл-Озек	49	20	10	47	126	71	82	76	83	70	47	55	0,53	0,75
Барнаул	43	23	9	66	141	65	88	77	83	74	37	47	0,57	0,70
00+54ч (день 2)														
Томск	31	16	16	73	136	66	82	76	66	82	35	35	0,48	0,66
Новосибирск	38	19	9	69	135	67	88	79	81	78	35	42	0,59	0,71
Кемерово	44	16	11	64	135	73	85	80	80	80	41	44	0,60	0,75
Кызыл-Озек	50	25	8	42	125	67	84	74	86	63	46	60	0,49	0,73
Барнаул	43	20	8	53	124	68	87	77	84	73	41	51	0,57	0,73

Таблица 8. Оценки прогнозов по центрам областей. Вариант R150 – гроза на более четверти станций в радиусе 150 км. Май – сентябрь 2017 г.

Пункт	Матрица сопряженности					Оценки в %							T	prv
	k11	k12	k21	k22	k00	O+	O-	OO	P+	P-	ФФ+	ПП+		
00+18ч (ночь 1)														
Томск	14	15	8	108	145	48	93	84	64	88	15	20	0,51	0,53
Новосибирск	12	15	9	109	145	44	92	83	57	88	14	19	0,45	0,48
Кемерово	15	24	9	97	145	38	92	77	63	80	17	27	0,43	0,46
Кызыл-Озек	17	27	3	98	145	39	97	79	85	78	14	30	0,63	0,53
Барнаул	16	23	6	100	145	41	94	80	73	81	15	27	0,54	0,51
00+42ч (ночь 2)														
Томск	14	15	7	104	140	48	94	84	67	87	15	21	0,54	0,54
Новосибирск	9	20	10	102	141	31	91	79	47	84	13	21	0,31	0,36
Кемерово	14	14	10	101	139	50	91	83	58	88	17	20	0,46	0,53
Кызыл-Озек	14	19	6	102	141	42	94	82	70	84	14	23	0,54	0,51
Барнаул	13	22	9	95	139	37	91	78	59	81	16	25	0,40	0,44
00+30ч (день 1)														
Томск	21	25	4	91	141	46	96	79	84	78	18	33	0,62	0,57
Новосибирск	16	17	9	99	141	48	92	82	64	85	18	23	0,49	0,53
Кемерово	19	22	10	90	141	46	90	77	66	80	21	29	0,46	0,52
Кызыл-Озек	20	13	3	73	109	61	96	85	87	85	21	30	0,72	0,69
Барнаул	17	18	10	96	141	49	91	80	63	84	19	25	0,47	0,53
00+54ч (день 2)														
Томск	20	21	5	89	135	49	95	81	80	81	19	30	0,61	0,58
Новосибирск	21	29	4	81	135	42	95	76	84	74	19	37	0,58	0,55
Кемерово	17	24	12	82	135	41	87	73	59	77	21	30	0,36	0,47
Кызыл-Озек	23	15	11	86	135	61	89	81	68	85	25	28	0,53	0,63
Барнаул	19	29	7	80	135	40	92	73	73	73	19	36	0,46	0,50

В среднем по областям (табл. 9) для ночных гроз прогнозы синоптиков более точны и имеют высокие показатели баланса между совпадением с фактом и предупрежденностью. Прогнозы по методу чаще ошибались, выдавая «ложные тревоги», но и чаще предупреждали об явлении. Особенно существенная разница в горной местности Республики Алтай, где ме-

год предупреждает грозы на 12 % лучше и примерно настолько же увеличивает «ложные тревоги». Для дневных гроз качество методических и синоптических прогнозов практически выравнивается за небольшим преимуществом последних. Отметим, что сравнение не совсем равноценно, поскольку в синоптические категории переводились изначально более детальные, а соответственно менее устойчивые, методические прогнозы.

Таблица 9. Сравнительные оценки оперативных прогнозов: метод, синоптики. Суммарные оценки по областям. Май – сентябрь 2017 г.

Пункт	Матрица сопряженности					Оценки в %							Т	p _{гв}
	k11	k12	k21	k22	k00	O+	O-	OO	P+	P-	ФФ+	ПП+		
Синоптики (ночь 1)														
Томская	60	33	5	54	152	65	92	75	92	62	43	61	0,54	0,73
Новосибирская	64	24	7	57	152	73	89	80	90	70	47	58	0,61	0,78
Кемеровская	66	22	2	62	152	75	97	84	97	74	45	58	0,71	0,82
Республика Алтай	37	24	10	81	152	61	89	78	79	77	31	40	0,56	0,66
Алтай	57	21	9	65	152	73	88	80	86	76	43	51	0,62	0,77
Сумма	284	124	33	319	760	70	91	79	90	72	42	54	0,62	0,76
Метод 00+18ч (ночь 1)														
Томская	61	54	3	34	152	53	92	63	95	39	42	76	0,34	0,66
Новосибирская	67	40	4	41	152	63	91	71	94	51	47	70	0,45	0,72
Кемеровская	62	25	6	59	152	71	91	80	91	70	45	57	0,61	0,77
Республика Алтай	43	48	4	57	152	47	93	66	91	54	31	60	0,46	0,61
Алтай	61	48	5	38	152	56	88	65	92	44	43	72	0,37	0,67
Сумма	294	215	22	229	760	58	91	69	93	52	42	67	0,45	0,68
Синоптики (день 1)														
Томская	63	32	9	48	152	66	84	73	88	60	47	63	0,48	0,73
Новосибирская	59	29	4	60	152	67	94	78	94	67	41	58	0,61	0,75
Кемеровская	71	28	5	48	152	72	91	78	93	63	50	65	0,57	0,78
Республика Алтай	50	27	9	66	152	65	88	76	85	71	39	51	0,56	0,71
Алтай	63	22	7	60	152	74	90	81	90	73	46	56	0,63	0,79
Сумма	305	139	34	282	760	69	89	77	90	67	45	58	0,57	0,75
Метод 00+30ч (день 1)														
Томская	65	29	7	51	152	69	88	76	90	64	47	62	0,54	0,75
Новосибирская	62	48	1	41	152	56	98	68	98	46	41	72	0,44	0,69
Кемеровская	71	47	5	29	152	60	85	66	93	38	50	78	0,32	0,70
Республика Алтай	56	47	3	46	152	54	94	67	95	49	39	68	0,44	0,67
Алтай	67	37	3	45	152	64	94	74	96	55	46	68	0,51	0,74
Сумма	321	208	19	212	760	61	92	70	94	50	45	70	0,45	0,71

Прогноз по центрам областей (табл. 10) показал сопоставимое качество методических и оперативных прогнозов лишь на севере территории в Томске и Новосибирске, для остальных пунктов точность оперативных прогнозов существенно выше. Для ночных гроз было добавлено сравнение с методом Ягудина, разработанным в 70-х годах прошлого столетия

и используемым в ЗС УГМС в качестве вспомогательного при составлении оперативных прогнозов по трем пунктам. Метод основан на статистическом анализе образования гроз по температурно-влажностным параметрам атмосферы из данных фактического радиозондирования. В результате построены диаграммы вероятности ночных гроз в зависимости от каждого значимого параметра отдельно. Прогноз составляется вручную, автоматизирован лишь расчет значений базовых параметров [5]. Как видно, по данному методу велика доля пропущенных гроз – от 70 % в Кемерово до 100 % в Барнауле.

Таблица 10. Сравнительные оценки оперативных прогнозов: метод, синоптики, Ягудин. Центры областей. R50 – гроза хотя бы на одной станции в радиусе 50 км. Май – сентябрь 2017 г.

Пункт	Матрица сопряженности					Оценки в %							T	p _{гв}
	k11	k12	k21	k22	k00	O+	O-	OO	P+	P-	ФФ+	ПП+		
Синоптики (ночь 1)														
Томск	18	28	3	103	152	39	97	80	86	79	14	30	0,64	0,53
Новосибирск	23	19	17	93	152	55	85	76	58	83	26	28	0,41	0,56
Кемерово	14	3	0	135	152	82	100	98	100	98	9	11	0,98	0,88
Кызыл-Озек	10	24	5	113	152	29	96	81	67	82	10	22	0,49	0,41
Барнаул	18	8	2	124	152	69	98	93	90	94	13	17	0,84	0,75
Метод 00+18ч (ночь 1)														
Томск	10	20	11	111	152	33	91	80	48	85	14	20	0,32	0,38
Новосибирск	25	23	15	89	152	52	86	75	63	79	26	32	0,42	0,55
Кемерово	12	34	2	104	152	26	98	76	86	75	9	30	0,61	0,44
Кызыл-Озек	8	15	7	122	152	35	95	86	53	89	10	15	0,42	0,40
Барнаул	9	29	11	103	152	24	90	74	45	78	13	25	0,23	0,30
Ягудин (ночь 1)														
Новосибирск	7	8	33	104	152	47	76	73	18	93	26	10	0,10	0,38
Кемерово	4	13	10	125	152	24	93	85	29	91	9	11	0,19	0,25
Барнаул	0	3	20	129	152	0	87	85	0	98	13	2	-0,02	0,0
Синоптики (день 1)														
Томск	23	34	4	91	152	40	96	75	85	73	18	38	0,58	0,54
Новосибирск	30	17	15	90	152	64	86	79	67	84	30	31	0,51	0,65
Кемерово	19	11	5	117	152	63	96	89	79	91	16	20	0,71	0,68
Кызыл-Озек	23	23	3	103	152	50	97	83	88	82	17	30	0,70	0,62
Барнаул	23	13	1	115	152	64	99	91	96	90	16	24	0,86	0,73
Метод 00+30ч (день 1)														
Томск	21	24	6	101	152	47	94	80	78	81	18	30	0,59	0,56
Новосибирск	32	16	12	92	152	67	88	82	73	85	29	32	0,58	0,68
Кемерово	21	39	2	90	152	35	98	73	91	70	15	39	0,61	0,52
Кызыл-Озек	15	23	11	103	152	39	90	78	58	82	17	25	0,39	0,45
Барнаул	18	10	6	118	152	64	95	89	75	92	16	18	0,67	0,68

Заключение

Впервые для территории Урало-Сибирского региона разработан автоматизированный метод прогноза гроз, технология которого позволяет использовать современную прогностическую продукцию COSMO-Ru_Sib и GFS (NCEP).

Проблема неустойчивости решений для редких природных явлений решалась за счет использования переменных радиусов для обучения, оценки и формулировок прогнозов.

Разработка доведена до полной автоматизации с очень экономичными оперативными расчетами на базе выходной модельной продукции COSMO-Ru_Sib и GFS (NCEP). В настоящее время прогнозы гроз, основанные на данных GFS (NCEP), являются основными в силу более высокого качества, на базе COSMO-Ru_Sib – вспомогательными. Предполагается продолжить сравнительный анализ оценок решений по двум моделям, тем более в связи с усовершенствованиями (например, уточнением описания топографии в модели COSMO-Ru_Sib).

Технология расчета прогнозов гроз позволяет оценить явление (грозу) как в конкретной точке (на станции), так и в различных радиусах за счет полученных многовариантных решений. Это дает синоптику возможность выбирать варианты между детализацией прогнозов или большей их устойчивостью.

Новая технология предоставляет полностью автоматизированные расчеты прогнозов гроз в виде таблиц, согласованных с оперативным подразделением. Кроме того, новая разработка имеет преимущество по заблаговременности и по качеству с используемым до настоящего времени в оперативной работе методом (прогноз ночных гроз, автор – Р.А. Ягудин, ГМЦ, ЗС УГМС).

По Решению Технического совета ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» от 28.11.2017 г., утвержденному Решением ЦМКП от 01.12.2017 г., автоматизированная технология (метод) расчета прогноза гроз заблаговременностью 1–2 суток внедряется в оперативную практику ЗС УГМС в качестве основного расчетного метода начиная со второй половины апреля 2018 года.

Список литературы

1. Губенко И.М., Рубинштейн К.Г. Пример сравнения индексов неустойчивости средней тропосферы в прогностической модели с информацией о грозовой активности // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 5. – С. 40–53.
2. Лбов Г.С., Манохин А.Н. Распознавание образов при разнотипных признаках в условиях малой выборки // Статистические проблемы управления. – 1976. – Вып. 14. – С. 57–63.

3. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиофизических прогнозов. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1991. – 77 с.

4. РД 52.27.724-2009. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. – Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009. – 50 с.

5. Ягудин Р.А. Грозы на юго-востоке Западной Сибири и их прогноз // Труды ЗСРНИГМИ. – 1977. – Вып. 30. – С. 47–55.

6. Huntrieser H., Schiesser H.H., Schmid W., Waldvogel A. Comparison of Traditional and Newly Developed Thunderstorm Indices for Switzerland // Wea. Forecast. – 1997. – Vol. 12. – P. 108–125.

*Д.Б. Киктев, М.А. Толстых, Р.Б. Зарипов, Е.Н. Круглова, И.А. Куликова,
В.П. Мелешко, В.М. Мирвис, Т.Ю. Львова, В.А. Матюгин*

**О РЕЗУЛЬТАТАХ СОВМЕСТНЫХ ОПЕРАТИВНЫХ ИСПЫТАНИЙ
ТЕХНОЛОГИИ ДЕТАЛИЗИРОВАННЫХ ПО ВРЕМЕНИ
АНСАМБЛЕВЫХ ДОЛГОСРОЧНЫХ ПРОГНОЗОВ НА ОСНОВЕ
ГЛОБАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ГИДРОМЕТЦЕНТРА РОССИИ
И ГГО ИМ. А.И. ВОЕЙКОВА**

Введение

Опыт зарубежных и отечественных исследований показал, что наиболее эффективным инструментом прогнозирования на внутрисезонных временных интервалах является ансамблевое гидродинамическое моделирование, а объединение результатов лучших, качественно близких прогностических моделей позволяет получить максимально возможную на современном уровне успешность прогнозов. Актуальность подобных работ определила кооперацию передовых прогностических центров в рамках международного проекта S2S (Subseasonal to Seasonal Prediction Project, <http://s2sprediction.net/>), стартовавшего под эгидой Всемирной программы исследования погоды и Всемирной программы исследований климата ВМО.

В России в этом направлении активно сотрудничают Гидрометцентр России (ГМЦ) с глобальной полулагранжевой моделью с адвекцией вихря (ПЛАВ) и Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова (ГГО) со спектральной моделью T63L25 [1]. В 2012 г. были инициированы работы по унификации технологий прогнозирования ГМЦ и ГГО с целью создания гибкой технологии ансамблевых внутрисезонных прогнозов на срок до 45 суток с недельной временной детализацией для первого прогностического месяца.

В апреле 2012 г. были организованы совместные оперативные испытания этих технологий по согласованной программе. Позднее, в связи с внесением изменений в версию модели ПЛАВ в начале 2016 г., испытательная выборка согласованных оперативных прогнозов была ограничена периодом с 30 марта 2016 г. по 15 марта 2017 г. и составила 51 прогноз.

По результатам испытаний, рассмотренным на заседании Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета (ЦМКП) 20 июня 2017 г. было принято решение о целесообразности использования прогнозов ГМЦ, ГГО и их комплекса (мультимодельных прогнозов) в качестве консультативных прогнозов в информационном обеспечении Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ). Ниже дается краткое описание технологии прогнозов, условий проведения и результатов испытаний.

1. Модели и технологии прогнозирования

В Гидрометцентре России по аналогии со схемой сезонного прогноза реализована технология выпуска долгосрочных прогнозов с недельной детализацией. Сходство технологий определяется единой вычислительной основой – моделью ПЛАВ Гидрометцентра России/Института вычислительной математики РАН [9] со среднесуточной дискретностью записи прогностической информации. Для оперативного долгосрочного прогноза рассчитывается ансамбль из 20 прогностических реализаций по версии модели ПЛАВ с горизонтальным разрешением $1,406^\circ$ по долготе, $1,125^\circ$ по широте и 28 уровнями по вертикали. При этом эволюция температуры поверхности океана (ТПО) и концентрации морского льда описывается с помощью наложения аномалий этих полей в момент начала расчета прогноза на средние климатические ежедневные значения с постепенным затуханием аномалии в течение прогностического периода. Технология генерации ансамблей начальных данных основана на методе «выращивания» быстрорастущих возмущений [16].

В ГГО технология детализированных по времени метеорологических прогнозов на срок до 45 суток основана на расчетах по спектральной модели атмосферы T63L25 (МОЦА MGO-3) [2]. Горизонтальное разрешение модели составляет $1,9^\circ \times 1,9^\circ$, по вертикали учитывается 25 уровней в сигма-системе координат, шаг интегрирования по времени составляет 10 минут. Граничные условия формулируются в предположении сохранения начального распределения аномалий ТПО без изменений на всем периоде интегрирования. Начальные аномалии концентрации морского льда удерживаются в течение 21 суток с последующей релаксацией к климатическому распределению. Ансамбль прогнозов включает девять расчетов с использованием слабо возмущенных начальных состояний атмосферы, которые генерируются посредством выращивания возмущений в модели на основе метода [7, 16]. Более подробную информацию о подготовке прогнозов в ГГО можно найти в [3, 4].

В технологиях ГМЦ и ГГО используются единые источники данных о начальном состоянии атмосферы и океана. Комплект начальных атмосферных полей формируется на основе оперативного объективного анализа с разрешением $2,5^\circ \times 2,5^\circ$, выполняемого

в Гидрометцентре России. В качестве исходной информации о ТПО и концентрации морского льда используются результаты их еженедельного анализа по методике [14], доступные на сайте <http://iridl.ldeo.columbia.edu>.

Для исключения систематических ошибок в результатах долгосрочного моделирования прогнозы представляются в виде полей аномалий относительно модельного климата. Модельные климатические поля оцениваются при этом по данным многолетних серий ретроспективных прогнозов. Для детализированных по времени прогнозов моделей ГМЦ и ГГО на 1,5 месяца сохранялись осредненные за сутки числовые поля, представленные в сетке $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ для пяти метеорологических характеристик: геопотенциала поверхности 500 гПа (H-500), давления на уровне моря (SLP), температуры воздуха на уровне 850 гПа (T-850) и у поверхности Земли (TRSF), а также интенсивности атмосферных осадков (PREC). Далее на этапе пост-обработки они используются для формирования в ГМЦ и ГГО независимых выходных комплектов прогностической информации с исключенными систематическими ошибками.

Унифицированный комплект прогноза по каждой технологии включает глобальные сеточные поля ($2,5^\circ \times 2,5^\circ$) средних ансамблевых аномалий и вероятностей трех градаций аномалий (ниже нормы, норма, выше нормы)* по каждой из пяти характеристик (H-500, SLP, T-850, TRSF, PREC) для шести периодов временного осреднения: недели 1, 2, 3, 4 (средние за 1–7, 8–14, 15–21, 22–28 сутки соответственно) и два месячных интервала: месяц 1 (1–30 сутки), месяц 2 (16–45 сутки) (всего 120 глобальных полей). Наличие прогностических данных с суточным временным разрешением позволяет гибко формировать на их основе средние поля для шести выбранных временных «окон» и в случае необходимости изменить временные интервалы для прогноза и для оценки качества прогностической схемы. Оценки параметров модельного климата и систематических ошибок осуществляются независимо в ГМЦ и ГГО для каждой модели по многолетним рядам ретроспективных прогнозов, охватывающих период с 1982 года.

Для территории Северо-Евразийского региона дополнительно предусмотрена пространственная детализация прогнозов приземной температуры воздуха и количества осадков для 70 пунктов, на которых проводятся метеорологические наблюдения (рис. 1).

Прогнозы в пунктах составляются с использованием билинейной интерполяции и корректировки систематических ошибок по данным ретроспективных прогнозов. Результаты прогнозов передаются по локальным и глобальным линиям связи, что позволяет объединить прогностическую деятельность ГМЦ и ГГО в единую технологическую линию для создания мультимодельного прогноза. При этом в каждой точке с равными весами объединяются

* Границы градаций соответствуют терциям климатического распределения аномалий.

средние ансамблевые аномалии (с исключенными систематическими ошибками) и вероятности трех градаций аномалий (ниже нормы, норма, выше нормы), полученные в ГМЦ по ансамблю из 20 прогнозов и в ГГО по ансамблю из 9 прогнозов. Более подробное описание единой технологической линии прогнозов содержится в [1].



Рис. 1. Схема расположения пунктов прогноза. Пунктирами показаны границы разделения на территории на долготные сектора.

Прогностические карты средних ансамблевых аномалий и вероятностей указанных выше метеорологических величин, полученные по прогнозам ГМЦ, ГГО и мультимодельному прогнозу с недельным и месячным разрешением, размещаются на сайте Северо-Евразийского климатического центра (<http://neacc.meteoinfo.ru/>) и регулярно (раз в неделю) обновляются. На рис. 2 приводится пример прогностической продукции для региона Северной Евразии.

2. Организация совместных оперативных испытаний

В рамках совместных оперативных испытаний был установлен график еженедельного выпуска прогнозов по средам с использованием в качестве исходной информации данных объективного анализа состояния атмосферы за 00 ч ВСВ и анализа состояния поверхности океана за предшествующую неделю. Обмен результатами прогнозов по согласованному формату осуществлялся до начала периода прогноза.

Были согласованы источники эталонных фактических данных, использующихся для оценки успешности прогнозов, а также методы, критерии и регионы оценивания.

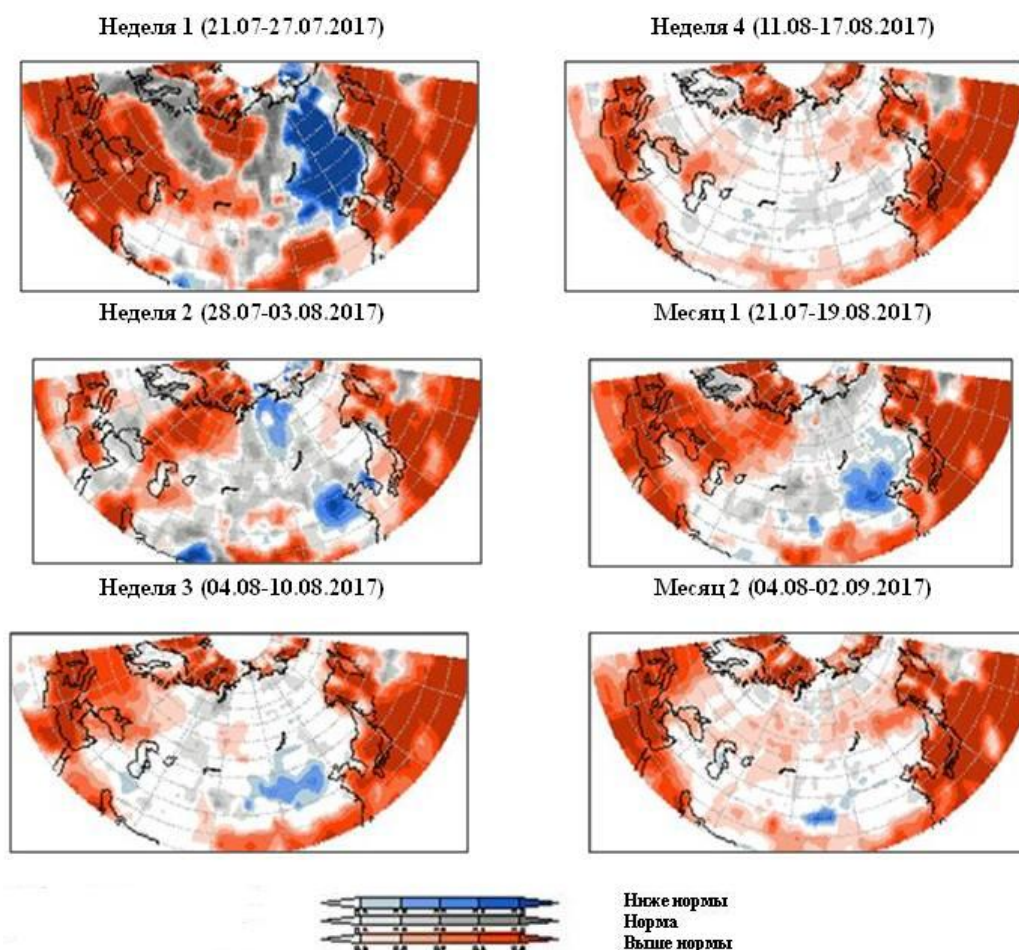


Рис. 2. Пример мультимодельного вероятностного прогноза приземной температуры воздуха для региона Северной Евразии (дата прогноза 20.07.2017 г.).

Для оценки сеточных полей эталонные фактические данные рассчитывались исходя из шестичасовых данных реанализа NOAA NCEP-DOE Reanalysis-2 [13]. Параметры эталонного климата оценивались по 30-летним рядам за 1981–2010 годы.

Для оценки прогнозов приземной температуры воздуха и количества осадков по пунктам фактические значения рассчитывались по результатам наблюдений на станциях. Параметры эталонных климатических распределений прогнозируемых переменных были рассчитаны по данным архива ВНИИГМИ-МЦД, доступного на сайте <http://meteo.ru/data>, за 1961–1990 гг. Использование для этой цели периода 1980–2010 гг. оказалось невозможным в связи с наличием большого количества пропусков в данных наблюдений в последнем десятилетии XX века.

В состав критериев оценки прогнозов по величине аномалий включены рекомендованные руководящими документами [8, 15]: средняя квадратическая ошибка (RMSE), относительная ошибка (Q), пространственный коэффициент корреляции аномалий (ACC), оценка прогноза аномалии по знаку (ρ) и оценка мастерства прогнозов по отношению

к климату (MSSS). Оценка успешности вероятностных прогнозов трех градаций в соответствии с требованиями [15] осуществлялась посредством расчетов площади под кривой ROC, сопоставляющей относительные доли удачных прогнозов и ложных тревог при различных уровнях пороговой вероятности. Формулы для расчетов и более подробную информацию по данным критериям можно найти в [6, 8, 15].

Перечисленные критерии рассчитывались по сеточным данным в пределах трех регионов: внетропические широты Северного полушария (20° с. ш. – 90° с. ш.), тропики (20° ю. ш. – 20° с. ш.), Северо-Евразийский регион (40° с. ш. – 70° с. ш., 20° в. д. – 180° в. д.). Успешность прогнозов в пунктах оценивалась по всем 70 станциям, а также отдельно по трем секторам (Европейская часть, Западная Сибирь, Восточная Сибирь и Дальний Восток). Границы разделения на сектора показаны линиями на рис. 1.

Успешность каждого прогноза ГМЦ, ГГО и их мультимодельного комплекса оценивалась индивидуально, а также интегрально по всему периоду испытаний. Оценки успешности рассчитывались независимо в ГМЦ и ГГО и впоследствии сопоставлялись.

3. Результаты оперативных испытаний

3.1. Оценки качества прогнозов сеточных полей

Оценки качества прогнозов полей аномалий по критериям RMSE, MSSS, ACC и ρ , полученные в среднем за период испытаний, приведены в табл. 1–4.

Данные табл. 1 показывают, что наибольшие различия в ошибках RMSE прогнозов на основе моделей ГГО и ГМЦ отмечались для приземной температуры воздуха на территории Северной Евразии и Северного полушария (внетропические широты). В тропиках различия в оценках были невелики. В отдельных случаях, за исключением приземной температуры воздуха, преимущественно на интервалах первой и четвертой недель, а также первого и второго месяца интегрирования, комплексирование прогнозов позволило улучшить их качество, хотя и незначительно.

Значения критерия ACC (табл. 2) подтверждают выявленные ранее различия между успешностью прогнозов ГГО и ГМЦ. В табл. 2 выделены графы, для которых различия средних ACC прогнозов ГГО и ГМЦ, при оценке их по двухвыборочному t-критерию Стьюдента, являются статистически значимыми (нулевая гипотеза отвергается на 5%-ном доверительном уровне). По этим данным, как и по RMS, наиболее значительные преимущества прогнозов ГГО отмечаются для температуры воздуха.

Отметим, что по всем методическим прогнозам (ГМЦ, ГГО и их комплексу) средние оценки ACC почти для всех метеорологических величин во всех регионах и на всех

интервалах прогноза – положительны (исключением являются оценки прогнозов на четвертую неделю по Северной Евразии).

Таблица 1. Средние значения RMSE прогнозов ГГО, ГМЦ и мультимодельного комплекса (МК) по территориям Северо-Евразийского региона (СЕР), внетропической зоны Северного полушария (СП) и тропиков (ТР)

Период	Метод прогноза	H-500, дкм			SLP, гПа			T-850, °C			TRSF, °C			PREC, (мм/сут)		
		СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР
Неделя 1	ГМЦ	4.16	3.90	0.87	3.53	3.34	0.92	1.92	1.75	0.97	2.41	2.25	0.75	1.94	2.76	5.66
	ГГО	3.79	3.42	0.82	3.21	2.98	0.91	1.73	1.62	0.98	2.08	1.72	0.74	1.67	2.49	5.9
	МК	3.55	3.27	0.71	2.97	2.83	0.78	1.62	1.51	0.91	2.04	1.80	0.70	1.67	2.44	5.49
Неделя 2	ГМЦ	8.41	7.62	1.19	6.79	6.12	1.34	3.38	2.97	1.16	3.52	2.95	0.89	2.13	3.08	5.84
	ГГО	7.24	6.51	1.09	5.98	5.39	1.22	2.85	2.60	1.15	3.05	2.43	0.84	1.89	2.80	5.96
	МК	7.31	6.55	1.03	5.97	5.31	1.16	2.85	2.57	1.08	3.05	2.49	0.82	1.90	2.80	5.68
Неделя 3	ГМЦ	9.29	8.12	1.28	7.11	6.39	1.41	3.62	3.13	1.20	3.73	2.98	0.89	2.03	2.99	5.81
	ГГО	8.35	7.16	1.17	6.51	5.78	1.29	3.31	2.83	1.17	3.43	2.61	0.86	1.95	2.86	5.95
	МК	8.48	7.29	1.15	6.53	5.79	1.26	3.31	2.83	1.12	3.43	2.65	0.83	1.93	2.83	5.72
Неделя 4	ГМЦ	8.83	7.53	1.27	6.41	5.85	1.34	3.51	2.96	1.16	3.68	2.90	0.88	1.97	2.85	5.78
	ГГО	8.72	7.43	1.15	6.45	5.86	1.29	3.39	2.91	1.15	3.48	2.66	0.84	1.93	2.86	5.95
	МК	8.56	7.29	1.13	6.26	5.69	1.24	3.34	2.85	1.12	3.46	2.67	0.83	1.91	2.80	5.72
Месяц 1	ГМЦ	4.88	4.22	0.76	3.52	3.29	0.81	2.00	1.69	0.81	2.34	2.05	0.64	1.08	1.62	3.53
	ГГО	4.42	3.80	0.69	3.33	3.12	0.78	1.79	1.53	0.82	1.99	1.57	0.60	1.03	1.54	3.65
	МК	4.45	3.78	0.68	3.26	3.01	0.72	1.80	1.52	0.78	2.03	1.68	0.59	1.01	1.51	3.43
Месяц 2	НМС	5.35	4.48	0.84	3.65	3.45	0.87	2.23	1.79	0.85	2.54	2.10	0.67	1.08	1.60	3.55
	ГГО	5.26	4.39	0.77	3.71	3.45	0.86	2.10	1.75	0.86	2.28	1.77	0.63	1.07	1.61	3.76
	МК	5.13	4.27	0.73	3.55	3.32	0.79	2.10	1.70	0.82	2.31	1.84	0.62	1.05	1.56	3.51

Таблица 2. Средние значения АСС прогнозов ГГО, ГМЦ и мультимодельного комплекса (МК) по территориям Северо-Евразийского региона (СЕР), внетропической зоны Северного полушария (СП) и тропиков (ТР)

Период	Метод прогноза	H-500, дкм			SLP, гПа			T-850, °C			TRSF, °C			PREC, (мм/сут)		
		СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР
Неделя 1	ГМЦ	0.84	0.84	0.65	0.8	0.79	0.65	0.79	0.78	0.49	0.67	0.57	0.49	0.39	0.37	0.21
	ГГО	0.87	0.87	0.71	0.83	0.83	0.66	0.81	0.8	0.51	0.75	0.74	0.53	0.47	0.46	0.26
	МК	0.88	0.88	0.73	0.85	0.84	0.72	0.83	0.83	0.57	0.76	0.74	0.57	0.48	0.47	0.29
Неделя 2	ГМЦ	0.31	0.31	0.33	0.23	0.26	0.31	0.30	0.31	0.18	0.26	0.2	0.23	0.13	0.12	0.11
	ГГО	0.38	0.40	0.38	0.25	0.3	0.41	0.36	0.38	0.24	0.37	0.42	0.35	0.17	0.18	0.16
	МК	0.38	0.40	0.41	0.28	0.32	0.41	0.39	0.39	0.26	0.37	0.37	0.34	0.17	0.18	0.18
Неделя 3	ГМЦ	0.00	0.03	0.2	-0.03	0.01	0.21	0.04	0.07	0.09	0.07	0.06	0.22	0.01	0.03	0.08
	ГГО	0.11	0.15	0.16	0.02	0.08	0.29	0.08	0.16	0.13	0.17	0.28	0.27	0.02	0.07	0.11
	МК	0.05	0.10	0.23	-0.02	0.05	0.29	0.08	0.14	0.14	0.14	0.22	0.29	0.03	0.06	0.13
Неделя 4	ГМЦ	-0.07	0.00	0.10	-0.01	0.03	0.16	-0.07	0.01	0.07	0.02	0.04	0.21	-0.02	0.04	0.07
	ГГО	-0.05	0.01	0.12	0.00	0.00	0.21	-0.04	0.03	0.12	0.08	0.21	0.27	0.03	0.03	0.11
	МК	-0.07	0.00	0.15	-0.01	0.01	0.22	-0.07	0.03	0.12	0.06	0.17	0.27	0.01	0.04	0.11
Месяц 1	ГМЦ	0.28	0.34	0.37	0.31	0.31	0.42	0.29	0.34	0.24	0.27	0.2	0.37	0.20	0.2	0.18
	ГГО	0.42	0.43	0.39	0.34	0.34	0.49	0.41	0.42	0.28	0.45	0.52	0.45	0.21	0.25	0.25
	МК	0.38	0.43	0.44	0.36	0.36	0.50	0.40	0.43	0.31	0.41	0.45	0.45	0.24	0.26	0.26
Месяц 2	НМС	0.02	0.04	0.21	0.04	0.05	0.33	0.01	0.08	0.15	0.09	0.07	0.3	0.04	0.08	0.13
	ГГО	0.04	0.07	0.22	0.00	0.03	0.36	0.08	0.12	0.17	0.22	0.34	0.36	0.05	0.09	0.17
	МК	0.06	0.07	0.27	0.01	0.05	0.40	0.08	0.13	0.19	0.19	0.27	0.36	0.05	0.10	0.19

На интервале первой недели (за исключением прогнозов осадков) оценки АСС превышают уровень 0,6, считающийся уровнем практической предсказуемости [12].

Обращают на себя внимание относительно невысокие показатели прогнозов на первую неделю в тропиках по сравнению с оценками по территории Северной Евразии и Северного полушария. На более длительных интервалах заблаговременности (четвертая неделя прогноза и второй месяц), когда состояние атмосферы зависит не столько от начальных условий, сколько от состояния океана и поверхности суши, наоборот, качество прогнозов в тропиках выше, чем во внетропических широтах. Данное обстоятельство, возможно, связано с наличием в тропиках крупномасштабных структур (например, ЭНЮК, осцилляция Маддена – Джулиана и др.), которые являются более инерционными, а потому и легче прогнозируемыми объектами.

Прогнозы осадков на всех временных интервалах характеризуются оценками АСС ниже уровня практической предсказуемости. На рис. 3 представлены графики временного хода АСС для первой (а), второй (б), третьей (в) и четвертой (г) недели. На графиках заметно ухудшение качества прогнозов осадков и ГМЦ и ГГО в течение летнего периода.

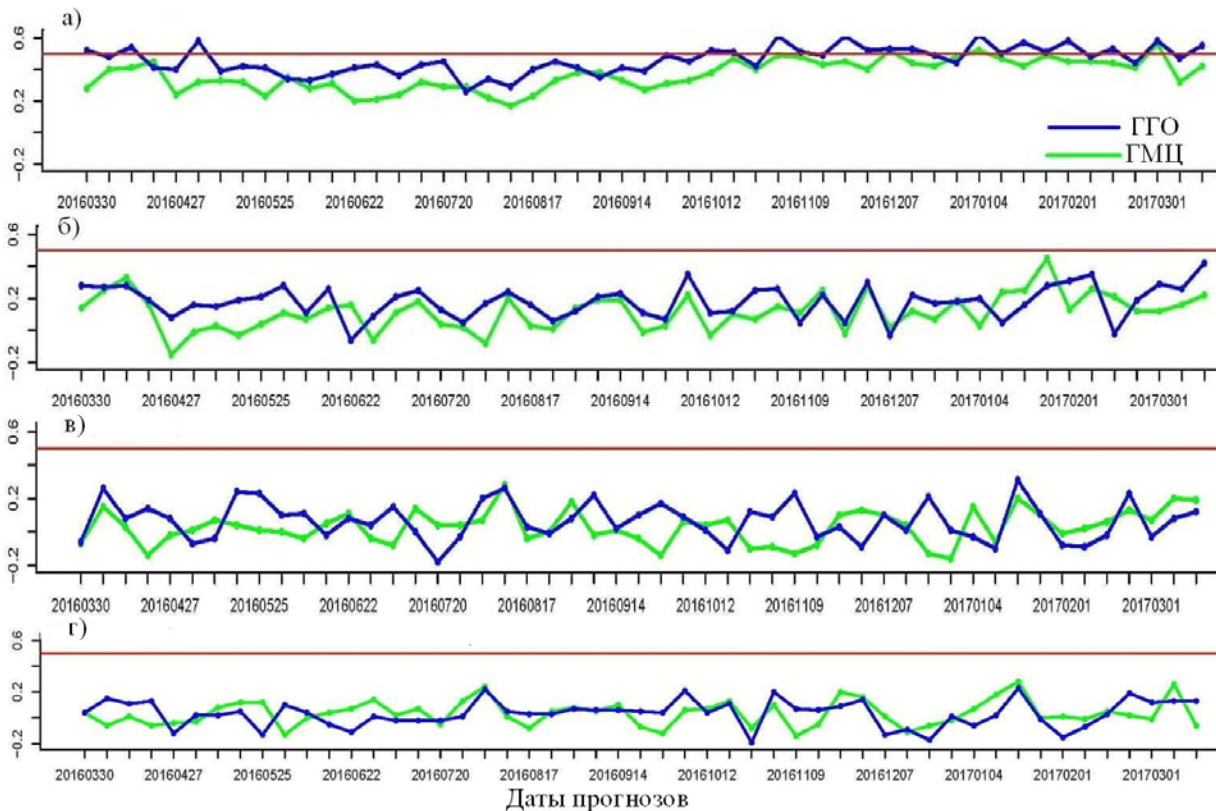


Рис. 3. Временные ряды оценок АСС прогнозов аномалий количества осадков для недели 1 (а), 2 (б), 3(в), 4 (г) для внетропической зоны Северного полушария за период испытаний.

В табл. 3 приведены средние оценки качества прогнозов по критерию MSSS, позволяющие определить преимущества методических прогнозов по сравнению с климатическими. Расчет статистической достоверности полученных оценок производился с помощью непараметрического метода повторных выборок с возвратом, известного как «бутстреп» [11]. Повторные выборки генерировались с помощью датчика случайных чисел в количестве, равном 100. Наряду со средними значениями MSSS для получения статистически значимых оценок (в пределах 10%-ного уровня) были оценены соответствующие доверительные интервалы.

Таблица 3. Средние значения MSSS прогнозов ГГО, ГМЦ и мультимодельного комплекса (МК) по территориям Северо-Евразийского региона (СЕР), внутритропической зоны Северного полушария (СП) и тропиков (ТР)

Период	Метод прогноза	H-500, дкм			SLP, гПа			T-850, °C			TRSF, °C			PREC, (мм/сут)		
		СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР
Неделя 1	ГМЦ	0,74	0,72	0,75	0,66	0,63	0,42	0,67	0,63	0,33	0,52	0,35	0,34	-0,11	-0,02	0,01
	ГГО	0,79	0,78	0,78	0,72	0,7	0,45	0,73	0,69	0,29	0,64	0,64	0,36	0,19	0,17	-0,07
	МК	0,82	0,8	0,83	0,76	0,74	0,6	0,76	0,73	0,4	0,66	0,59	0,43	0,18	0,19	0,07
Неделя 2	ГМЦ	-0,06	-0,1	0,51	-0,25	-0,23	-0,23	-0,05	-0,07	0,04	0	-0,1	0,04	-0,32	-0,27	-0,05
	ГГО	0,22	0,2	0,59	0,02	0,02	0,01	0,25	0,18	0,06	0,23	0,26	0,16	-0,02	-0,04	-0,1
	МК	0,2	0,19	0,63	0,02	0,06	0,1	0,25	0,2	0,15	0,25	0,22	0,2	-0,04	-0,04	0,01
Неделя 3	ГМЦ	-0,28	-0,25	0,41	-0,36	-0,34	-0,33	-0,22	-0,18	-0,02	-0,12	-0,12	0,04	-0,18	-0,18	-0,05
	ГГО	-0,01	0,03	0,51	-0,14	-0,11	-0,12	0	0,03	0,03	0,04	0,14	0,11	-0,08	-0,08	-0,1
	МК	-0,05	-0,01	0,52	-0,15	-0,11	-0,05	-0,01	0,03	0,09	0,05	0,12	0,17	-0,06	-0,06	-0,01
Неделя 4	ГМЦ	-0,14	-0,08	0,39	-0,11	-0,14	-0,24	-0,17	-0,08	0,02	-0,12	-0,09	0,05	-0,12	-0,08	-0,03
	ГГО	-0,12	-0,06	0,5	-0,13	-0,16	-0,13	-0,09	-0,04	0,04	-0,01	0,1	0,13	-0,07	-0,09	-0,1
	МК	-0,07	-0,02	0,51	-0,06	-0,08	-0,05	-0,06	0	0,1	0	0,09	0,16	-0,05	-0,04	-0,01
Месяц 1	ГМЦ	0,09	0,11	0,72	-0,05	-0,09	-0,14	0,15	0,15	0,22	0,09	-0,02	0,24	-0,11	-0,12	-0,01
	ГГО	0,24	0,27	0,77	0,06	0,01	0	0,32	0,31	0,2	0,33	0,43	0,33	0,02	-0,01	-0,08
	МК	0,24	0,28	0,78	0,09	0,08	0,12	0,31	0,32	0,28	0,31	0,33	0,36	0,03	0,03	0,05
Месяц 2	НМС	-0,13	-0,03	0,62	-0,13	-0,21	-0,26	-0,12	0,02	0,12	-0,09	-0,07	0,14	-0,11	-0,1	-0,03
	ГГО	-0,08	0,02	0,69	-0,14	-0,19	-0,23	-0,01	0,07	0,11	0,09	0,26	0,23	-0,07	-0,11	-0,15
	МК	-0,04	0,07	0,72	-0,06	-0,11	-0,04	0	0,11	0,19	0,08	0,2	0,26	-0,04	-0,04	0

Как видно, для первой недели качество прогнозов ГМЦ и ГГО, как правило, выше климатического. Исключением являются прогнозы осадков, полученные на базе модели ГМЦ. На второй неделе качество прогнозов резко падает. Однако в прогнозах по модели ГГО и на этом временном интервале качество прогнозов полей H-500 и температуры воздуха остается выше уровня климатических прогнозов. На третьей и четвертой неделях значимое превосходство всех методических прогнозов по сравнению с климатом сохраняется только в тропиках для H-500, а также для TRSF, за исключением прогнозов ГМЦ.

Оценки MSSS для первого месяца значимо положительны во всех регионах для прогнозов аномалий H-500 и T-850 по обеим моделям и для прогнозов приземной температуры воздуха по модели ГГО, а в тропиках также и по модели ГМЦ. Особо следует

отметить, что мультимодельные прогнозы на этом временном интервале имеют значимо положительные оценки (содержат полезный сигнал) для всех переменных, за исключением осадков.

Для месячного интервала с двухнедельной заблаговременностью (месяц 2) полезный сигнал прослеживается для всех регионов в прогнозах приземной температуры воздуха по модели ГГО и мультимодельному комплексу. В тропиках различия между оценками MSSS для прогнозов ГГО и ГМЦ менее существенны, причем во многих случаях оценки остаются выше климатических на более длительных интервалах интегрирования. Нельзя не отметить, что для полей H-500 полезный сигнал в тропиках прослеживается на всех интервалах прогноза.

Прогнозы осадков по MSSS значимо положительны только для первой недели: в прогнозах ГГО – за исключением тропиков, в мультимодельных прогнозах – по всем регионам.

В табл. 4 приведены оценки по критерию ρ , характеризующему степень совпадения прогностических и фактических аномалий по знаку. Здесь также прогнозы ГГО для температуры воздуха имеют более высокую оправдываемость по сравнению с прогнозами ГМЦ. Для других характеристик расхождения в оценках незначительны. Обращают на себя внимание высокие оценки ρ для всех методических прогнозов H-500 в тропических широтах на всех интервалах прогноза.

Таблица 4. Средние значения ρ прогнозов ГГО, ГМЦ и мультимодельного комплекса (МК) по территориям Северо-Евразийского региона (СЕР), внетропической зоны Северного полушария (СП) и тропиков (ТР)

Период	Метод прогноза	H-500, дкм			SLP, гПа			T-850, °C			TRSF, °C			PREC, мм/сут		
		СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР
Неделя 1	ГМЦ	0.65	0.66	0.72	0.60	0.57	0.47	0.62	0.57	0.40	0.55	0.52	0.55	0.33	0.32	0.22
	ГГО	0.69	0.70	0.77	0.62	0.59	0.50	0.65	0.59	0.44	0.61	0.60	0.55	0.34	0.34	0.25
	МК	0.70	0.72	0.79	0.65	0.62	0.55	0.67	0.62	0.46	0.63	0.60	0.57	0.36	0.36	0.26
Неделя 2	ГМЦ	0.25	0.31	0.65	0.15	0.17	0.25	0.26	0.25	0.30	0.25	0.28	0.46	0.13	0.13	0.14
	ГГО	0.33	0.39	0.71	0.17	0.19	0.30	0.33	0.31	0.36	0.37	0.40	0.49	0.09	0.11	0.17
	МК	0.33	0.39	0.71	0.20	0.22	0.31	0.33	0.31	0.38	0.35	0.39	0.49	0.13	0.13	0.17
Неделя 3	ГМЦ	0.10	0.22	0.61	0.00	0.01	0.14	0.10	0.16	0.30	0.13	0.23	0.45	0.03	0.06	0.11
	ГГО	0.17	0.28	0.69	0.01	0.05	0.18	0.15	0.21	0.32	0.22	0.32	0.46	0.01	0.04	0.12
	МК	0.15	0.28	0.69	0.01	0.03	0.18	0.25	0.21	0.36	0.20	0.32	0.47	0.01	0.05	0.13
Неделя 4	ГМЦ	0.07	0.23	0.64	0.03	0.04	0.10	0.00	0.15	0.31	0.08	0.24	0.44	-0.02	0.05	0.10
	ГГО	0.05	0.23	0.68	0.01	-0.01	0.14	0.04	0.16	0.31	0.14	0.29	0.45	-0.01	0.03	0.09
	МК	0.07	0.26	0.70	0.03	0.01	0.14	0.04	0.18	0.35	0.14	0.31	0.46	-0.02	0.04	0.10
Месяц 1	ГМЦ	0.31	0.46	0.77	0.24	0.21	0.29	0.30	0.36	0.39	0.29	0.38	0.56	0.14	0.15	0.16
	ГГО	0.40	0.52	0.85	0.26	0.19	0.31	0.40	0.42	0.39	0.44	0.52	0.56	0.14	0.16	0.19
	МК	0.36	0.52	0.85	0.28	0.21	0.32	0.39	0.43	0.42	0.40	0.51	0.58	0.15	0.18	0.20
Месяц 2	НМС	0.16	0.40	0.79	0.13	0.07	0.21	0.10	0.29	0.37	0.15	0.35	0.52	0.04	0.06	0.11
	ГГО	0.17	0.39	0.83	0.05	0.02	0.21	0.16	0.29	0.35	0.26	0.42	0.51	0.02	0.05	0.12
	МК	0.20	0.43	0.85	0.14	0.06	0.24	0.16	0.32	0.40	0.24	0.44	0.53	0.02	0.06	0.14

Успешность вероятностных прогнозов оценивалась по критерию ROC, который рассчитывался по всей совокупности вероятностных прогнозов каждой из трех градаций аномалии прогностической величины [15].

Анализ успешности вероятностных прогнозов по ROC в целом подтвердил ранее сделанные выводы. Наиболее заметные расхождения между прогнозами ГМЦ и ГГО, как и в случае детерминированных прогнозов, отмечались для приземной температуры воздуха. Для осадков уровень успешности прогнозов ГМЦ и ГГО за пределами первой недели практически не отличался от случайного. Вместе с тем следует отметить некоторое расширение временного интервала «полезности» вероятностных прогнозов, особенно для крайних градаций (ниже/выше нормы).

Полезный сигнал прослеживается для обоих месячных интервалов практически по всем прогностическим переменным, причем наиболее устойчивые оценки, заметно превышающие $ROC = 0,5$, соответствуют мультимодельным прогнозам. На рис. 4 показаны оценки ROC по всем прогностическим переменным, полученные по внутропической зоне Северного полушария.

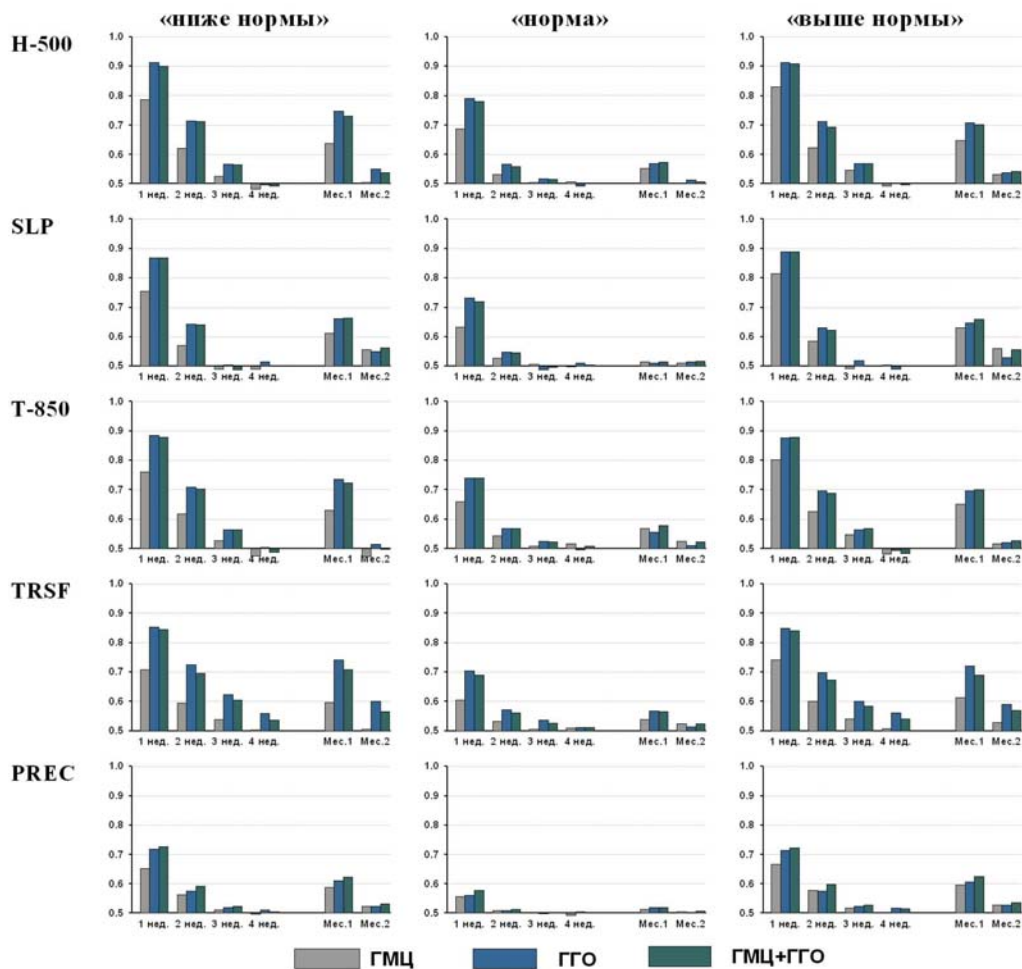


Рис. 4. Оценки ROC вероятностных прогнозов ГМЦ, ГГО и мультимодельного комплекса (ГМЦ+ГГО) по внутропической зоне Северного полушария.

Для градации норма, которая заключена в относительно узкой полосе значений около нормы, характерно общеизвестное ухудшение качества прогнозов по ROC для всех рассматриваемых метеорологических величин.

3.2. Оценки качества прогнозов по станциям

Предусмотренная программой испытаний подготовка прогнозов приземной температуры воздуха и количества осадков в пунктах и оценка их успешности с использованием непосредственных результатов наблюдений на станциях представляют несомненный интерес для потенциальных потребителей прогностической информации и населения. Результаты оценок этих прогнозов по критериям MSSS и ACC, полученные по всему региону и в каждом из трех долготных секторов, приведены в табл. 5. Здесь, как и в табл. 3, выделены графы, для которых оценки были значимо положительны (методические прогнозы превосходили уровень климатического прогноза).

Таблица 5. Средние значения успешности MSSS и ACC прогнозов ГМЦ, ГГО и мультимодельных (МК), рассчитанные для температуры воздуха и осадков по станциям

Период прогноза	Прогнозы температуры воздуха						Прогнозы количества осадков					
	MSSS			ACC			MSSS			ACC		
	ГМЦ	ГГО	МК	ГМЦ	ГГО	МК	ГМЦ	ГГО	МК	ГМЦ	ГГО	МК
Северо-Евразийский регион (70 станций)												
Неделя 1	0.55	0.72	0.71	0.65	0.78	0.77	0.12	0.13	0.16	0.38	0.41	0.46
Неделя 2	0.11	0.37	0.37	0.20	0.40	0.35	-0.05	-0.07	-0.03	0.08	0.11	0.11
Неделя 3	0.01	0.17	0.18	0.04	0.20	0.15	-0.00	-0.11	-0.03	0.03	-0.02	0.00
Неделя 4	0.02	0.11	0.14	-0.01	0.10	0.06	-0.01	-0.13	-0.05	0.01	-0.02	-0.02
Месяц 1	0.26	0.50	0.49	0.22	0.47	0.41	0.02	0.01	0.04	0.17	0.18	0.21
Месяц 2	0.12	0.30	0.30	0.03	0.25	0.20	-0.00	-0.05	-0.00	0.03	0.06	0.06
Европейская часть												
Неделя 1	0.57	0.74	0.74	0.61	0.77	0.73	0.09	0.10	0.14	0.37	0.41	0.43
Неделя 2	0.09	0.26	0.32	0.17	0.32	0.27	-0.06	-0.09	-0.04	0.11	0.16	0.16
Неделя 3	-0.03	0.07	0.11	0.02	0.19	0.11	-0.02	-0.11	-0.04	0.01	0.10	0.08
Неделя 4	0.03	0.05	0.12	0.01	0.13	0.07	-0.02	-0.12	-0.05	-0.05	0.06	0.03
Месяц 1	0.22	0.42	0.45	0.21	0.43	0.36	-0.00	-0.03	0.02	0.13	0.22	0.22
Месяц 2	0.11	0.17	0.25	0.06	0.22	0.21	-0.01	-0.07	-0.01	-0.02	0.12	0.10
Западная Сибирь												
Неделя 1	0.54	0.72	0.70	0.54	0.74	0.69	0.11	0.11	0.15	0.36	0.45	0.48
Неделя 2	0.12	0.40	0.37	0.20	0.45	0.38	-0.00	-0.06	-0.00	0.13	0.13	0.16
Неделя 3	-0.08	0.05	0.06	-0.04	0.18	0.08	0.00	-0.08	-0.02	0.02	-0.01	0.00
Неделя 4	-0.04	0.03	0.06	-0.02	0.18	0.12	0.01	-0.11	-0.04	0.08	-0.04	-0.02
Месяц 1	0.19	0.38	0.40	0.11	0.49	0.38	0.05	0.05	0.08	0.19	0.20	0.24
Месяц 2	0.03	0.12	0.17	-0.10	0.25	0.12	0.03	-0.01	0.03	0.07	0.10	0.09
Восточная Сибирь и Дальний Восток												
Неделя 1	0.54	0.70	0.70	0.64	0.73	0.74	0.13	0.15	0.18	0.38	0.44	0.46
Неделя 2	0.12	0.43	0.40	0.15	0.38	0.31	-0.07	-0.06	-0.03	0.04	0.16	0.19
Неделя 3	0.12	0.33	0.32	0.06	0.20	0.18	0.00	-0.12	-0.03	0.05	0.01	0.05
Неделя 4	0.07	0.22	0.22	0.03	0.15	0.13	-0.01	-0.14	-0.06	0.01	0.07	0.06
Месяц 1	0.32	0.63	0.57	0.23	0.51	0.44	0.01	0.02	0.04	0.14	0.11	0.13
Месяц 2	0.18	0.47	0.41	0.09	0.35	0.29	-0.01	-0.06	-0.02	0.02	0.01	0.01

Данные табл. 5 показывают, что прогнозы температуры воздуха по модели ГГО были точнее климатического прогноза на всех временных интервалах. Соответствующие оценки прогнозов по модели ГМЦ заметно ниже, но в целом по территории были лучше климатических на интервалах первой и второй недель, а также для обоих месячных интервалов. Наименее успешными по данным испытательной выборки были все методические прогнозы температуры воздуха по Западной Сибири (MSSS на периодах третьей и четвертой недель близки к нулю). Оценки мультимодельных прогнозов температуры на всех периодах значимо не отличались от оценок прогнозов ГГО, при этом в ряде случаев они были наилучшими и более устойчивыми во времени и пространстве.

Следует отметить относительно более высокий уровень оценок прогнозов температуры воздуха по MSSS, полученный для Северо-Евразийского региона по станциям, по сравнению с оценками по сеточным полям. Вероятно, главной причиной этого является разница в периодах оценки параметров эталонного климата. Оценки климатических прогнозов при использовании эталона 1961–1990 гг. оказываются заниженными вследствие смещенности в условиях существенной нестационарности временных рядов температуры воздуха. Ошибки RMSE прогнозов ГГО приземной температуры воздуха для этого региона, рассчитанные по станциям, составили в среднем $\sim 2,1$ °C для первого месяца и $\sim 2,5$ °C в прогнозах на месяц с двухнедельной заблаговременностью.

При расчете по сетке аналогичные оценки составляли $\sim 2,0$ °C для первого месяца и $\sim 2,3$ °C для второго месячного интервала.

Оценки прогнозов осадков по критерию MSSS при расчете по станциям, как и по сетке, были лучше климатических только на интервале первой недели. По ACC значимо положительная пространственная корреляция прогностических и фактических аномалий прослеживается на интервалах первой и второй недель и первого месяца. Наилучшие оценки в прогнозах осадков получены для мультимодельных прогнозов.

Оценки вероятностных прогнозов температуры и осадков на станциях по критерию ROC представлены на рис. 5 и 6 соответственно в виде столбчатых диаграмм. Горизонтальная ось всех графиков соответствует значению 0,5, характеризующему уровень климатических прогнозов. Как видно, для температуры воздуха успешность прогнозов ГГО была заметно выше, чем ГМЦ, и в большинстве случаев выше успешности мультимодельных прогнозов.

При увеличении заблаговременности прогнозов значение ROC для мультимодельных прогнозов приближается к оценкам прогнозов ГГО, а в ряде случаев и выше последних. В прогнозах вероятностей крайних градаций полезный сигнал явно прослеживается в прогнозах ГГО и мультимодельного комплекса на интервалах 1–3 недель и обоих месячных

периодов (значения ROC $\sim 0,6$). Оценки прогнозов ГМЦ были несколько ниже, но на интервале 1–2 недель и первого месяца также существенно лучше климатических. Относительно более низкими в период испытаний были оценки по Западной Сибири. Для прогнозов в градации норма оценки ROC за границей двух недель приближаются к 0,5. В месячных прогнозах полезный сигнал проявляется слабо.

Для крайних градаций осадков полезный сигнал уверенно прослеживается в прогнозах на первую неделю и гораздо более слабо на интервале второй недели и первого месяца. Наилучшие оценки везде соответствуют мультимодельным прогнозам. Прогнозы градации «норма» имеют низкие оценки ROC, лишь ненамного превышающие 0,5 даже для прогнозов на первую неделю.

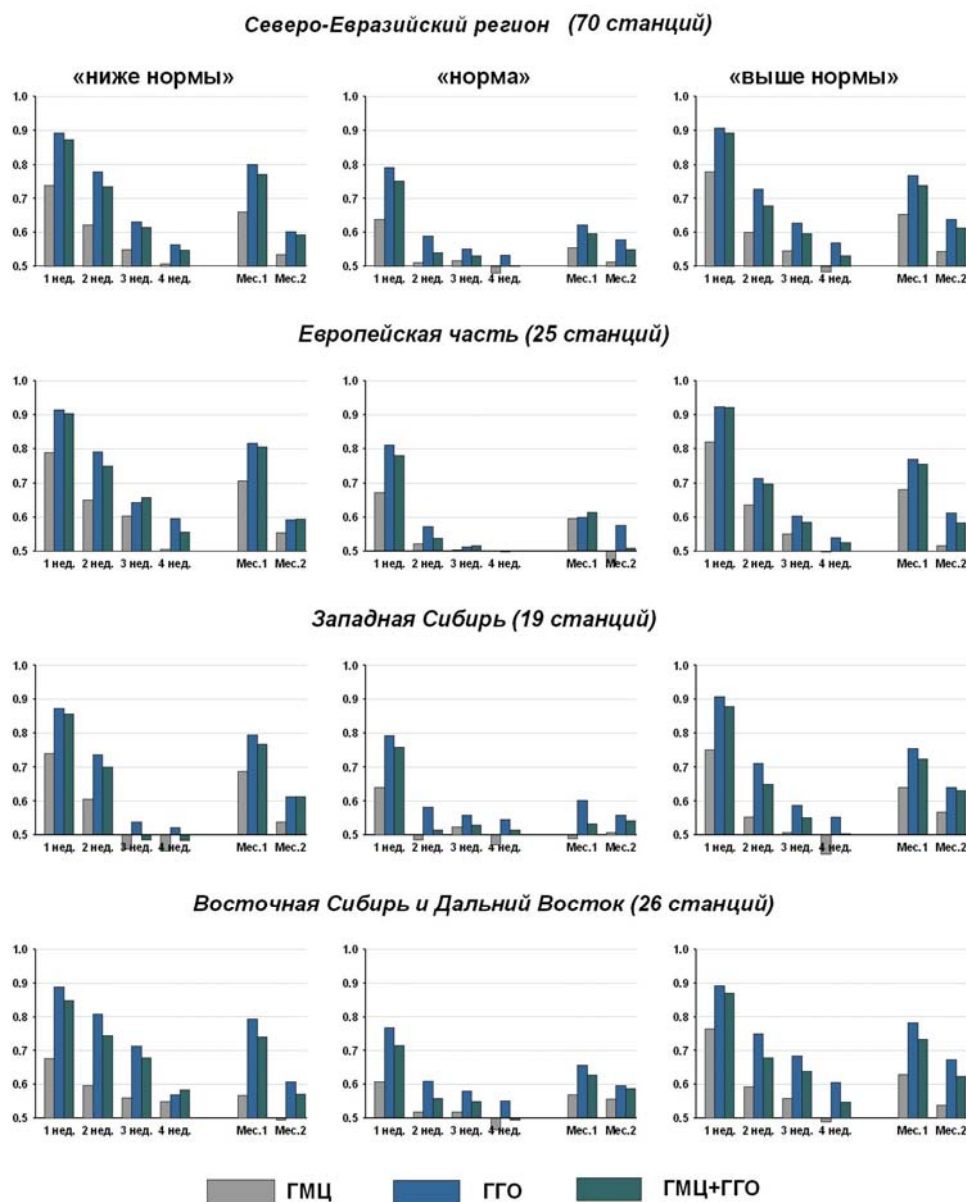
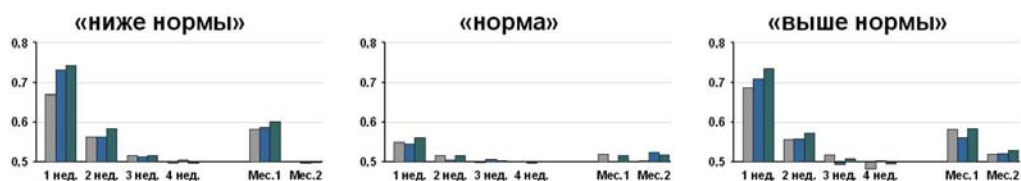
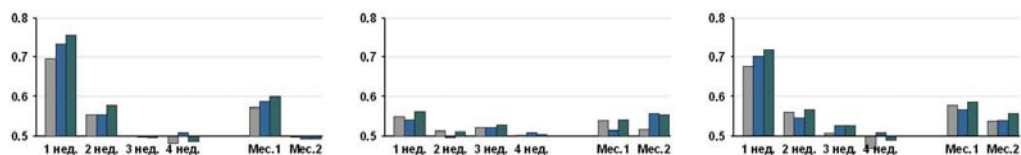


Рис. 5. Интегральные оценки ROC вероятностных прогнозов приземной температуры воздуха по данным метеорологических станций.

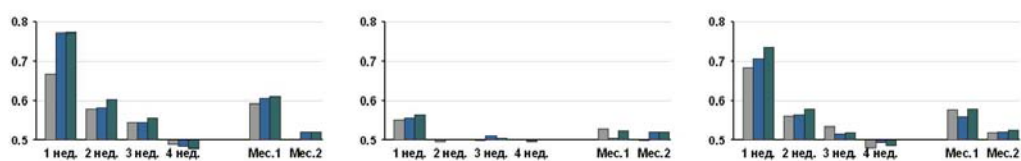
Северо-Евразийский регион (70 станций)



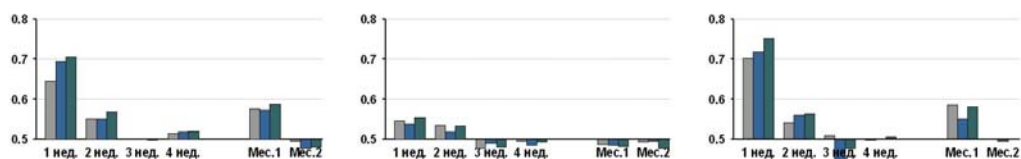
Европейская часть (25 станций)



Западная Сибирь (19 станций)



Восточная Сибирь и Дальний Восток (26 станций)



ГМЦ ГГО ГМЦ+ГГО

Рис. 6. Интегральные оценки ROC вероятностных прогнозов осадков по данным метеорологических станций.

Заключение

Проведенные испытания позволили оценить современные возможности использования моделей атмосферы ГГО и ГМЦ для целей долгосрочного прогнозирования метеорологических условий.

Оценки успешности прогнозов свидетельствуют о наличии полезного сигнала для большинства рассмотренных метеорологических величин во внетропических широтах на недельных (в ряде случаев до 2–3 недель) и месячных интервалах времени, в тропических широтах – для всех рассматриваемых интервалов прогноза. Исключение представляют осадки, прогнозы которых за пределами недельного интервала малоинформативны.

По результатам испытаний наибольшие различия в успешности прогнозов на основе моделей ГГО и ГМЦ отмечались для приземной температуры воздуха на территории

Северной Евразии и Северного полушария (внетропические широты). В тропиках различия в успешности прогнозов невелики.

Использование мультимодельного ансамбля в ряде случаев позволяет повысить показатели успешности, особенно при прогнозе осадков. Для месячных прогнозов наиболее заметные преимущества комплексирования проявляются в оценках полей атмосферного давления. Мультимодельные прогнозы, как правило, характеризуются более устойчивыми показателями успешности и меньше варьируют от прогноза к прогнозу.

Переход от детерминированных (среднее по ансамблю) к вероятностным прогнозам позволяет расширить предел предсказуемости крайних градаций всех рассматриваемых метеорологических величин, кроме осадков. Полезный сигнал прослеживается в недельных прогнозах до 2–3 недель и для обоих месячных периодов прогноза. Для градации «норма» уровень полезной предсказуемости ограничивается первой неделей. Этот же уровень сохраняется и для осадков.

В соответствии с рекомендациями ЦМКП, в оперативную практику в качестве консультативных прогнозов внедрены недельные и месячные прогнозы аномалий H-500, атмосферного давления на уровне моря, температуры воздуха на уровне 850 гПа и у поверхности Земли, а также атмосферных осадков на основе моделей ПЛАВ (ГМЦ), T63L25 (ГГО) и мультимодельного ансамбля на срок до 45 дней. Результаты прогнозов средних по ансамблю аномалий (детерминированные прогнозы), а также вероятностей указанных выше метеорологических величин для трех основных градаций (ниже нормы, норма и выше нормы) с недельным и месячным разрешением регулярно размещаются на сайте Северо-Евразийского климатического центра (<http://neacc.meteoinfo.ru/>).

В ГМЦ и ГГО продолжаются исследования, направленные на улучшение качества прогнозов на основе развития глобальных моделей общей циркуляции атмосферы и океана высокого пространственного разрешения и их совместного использования, улучшения методов параметризации физических процессов, привлечения более полной информации о начальном состоянии атмосферы и океана, оптимизации процедур интерпретации результатов моделирования и построения мультимодельных ансамблей. В ГМЦ подготовлена новая версия модели ПЛАВ [10], на ее основе развивается совместная модель атмосферы, океана и морского льда. Для построения ансамбля начальных данных в дальнейшем будет использоваться алгоритм усвоения данных на основе локального ансамблевого фильтра Калмана с преобразованием ансамбля.

В ГГО создана версия совместной модели океан – атмосфера (МОЦАО), объединяющая блок циркуляции океана ИВМ РАН и версию атмосферной модели T42L25 ГГО, которая успешно апробирована на ретроспективных сезонных прогнозах [5]. В настоящее время

ведутся работы по подготовке прогностической версии МОЦАО с использованием модели атмосферы T63L25 с обновленными параметризациями физических процессов.

Список литературы

1. Киктев Д.Б., Толстых М.А., Зарипов Р.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Тищенко В.А., Хан В.М. Выпуск детализированных метеорологических прогнозов в рамках деятельности Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) // Труды Гидрометцентра России. – 2017. – Вып. 366. – С. 14-28.
2. Мелешко В.П., Матюгин В.А., Спорышев П.В., Павлова Т.В., Говоркова В.А., Школьник И.М., Байдин А.В. Модель общей циркуляции атмосферы ГГО (версия MGO-03 T63L25) // Труды ГГО. – 2014. – Вып. 571. – С. 5-87.
3. Мирвис В.М., Львова Т.Ю., Матюгин В.А. Новая технология ансамблевого гидродинамического прогноза на 45 суток и региональные оценки успешности прогнозов для Северной Евразии // Труды ГГО. – 2014. – Вып. 570. – С. 5-33.
4. Мирвис В.М., Мелешко В.П., Львова Т.Ю., Матюгин В.А. Пятилетний опыт оперативного прогнозирования метеорологических условий на срок до 45 суток на основе модели общей циркуляции атмосферы ГГО (версия MGO-3 T63L25) // Труды Гидрометцентра России. – 2017. – Вып. 366. – С. 29-50.
5. Мирвис В.М., Мелешко В.П., Львова Т.Ю., Матюгин В.А., Байдин А. В. Прогностические эксперименты на основе совместной модели океан – атмосфера ГГО // Труды ГГО. – 2016. – Вып. 583. – С. 129-148.
6. Муравьев А.В., Вильфанд Р.М. О стандартизации оценок качества прогнозов на средние и долгие сроки // Метеорология и гидрология. – 2000. – № 12. – С. 24-34.
7. Пичугин Ю.А., Мелешко В.П., Матюгин В.А., Гаврилина В.М. Гидродинамические долгосрочные прогнозы погоды по ансамблю начальных состояний // Метеорология и гидрология. – 1998. – № 2. – С. 5-15.
8. РД.52.27.284-91. Методические указания по проведению производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиофизических прогнозов. – 150 с.
9. Толстых М.А. Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. – М.; Обнинск: ОАО ФОР, 2010. – 111 с.
10. Толстых М.А., Шашкин В.В., Фадеев Р.Ю., Шляева А.В., Мизяк В.Г., Рогутов В.С. Богословский Н.Н., Гойман Г.С., Махнорылова С.В., Юрова А.Ю. Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза. – М.: Триада лтд, 2017. – 66 с.

11. Эфрон Б. Нетрадиционные методы многомерного статистического анализа. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 263 с.
12. Hollingsworth A., Arpe, K., Tiedtke M. et al. The Performance of a Medium_Range Forecast Model in Winter-Impact of Physical Parameterization // Mon. Wea. Rev. – 1980. – Vol. 108. – P. 1736-1773.
13. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S-K., Hnilo J. J., Fiorino M., Potter G. L. NCEP–DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 2002. – Vol. 83. – P. 1631-1643.
14. Reynolds R.W., Rayner N.A., Smith T.M., Stokes D.C., Wang W. An Improved In Situ and Satellite SST Analysis for Climate // J. Climate. – 2002. – Vol. 15. – P. 1609-1625.
15. Standardized Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF) // New Attachment II-9 to the Manual on the GDPS (WMO-No. 485). Vol. I. – Geneva: WMO, 2002. – 24 p.
16. Toth Z., Kalnay E. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method // Mon. Wea. Rev. – 1997. – Vol. 125. – P. 3297-3319.

В.В. Крохин, А.Ю. Филь, Л.И. Евдокимова, М.Б. Моисеев

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД КРАТКОСРОЧНОГО (С ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ ДО 72 Ч) ПРОГНОЗА ПОЛОЖЕНИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА ЧИСЛЕННОЙ РЕГИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛЬЮ HWRF И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕГО ИСПЫТАНИЯ

Введение

Прогнозирование тропических циклонов северо-западной части Тихого океана является важной и актуальной задачей Росгидромета по обеспечению гидрометеорологической безопасности населения и отраслей экономики Дальнего Востока. Автоматизированный метод краткосрочного (с заблаговременностью до 72 ч) прогноза положения тропических циклонов (ТЦ) северо-западной части Тихого океана и реализующая его технология (HWRF-Ru) разрабатывались в 2011–2016 гг. ФГБУ «ДВНИГМИ» в рамках НИР 1.1.1.6 «Развитие технологий краткосрочных прогнозов опасных метеорологических явлений и тропических циклонов на территории Дальнего Востока с использованием модели WRF» и 1.1.1.5 «Разработать технологии прогноза перемещения и эволюции тропических циклонов и сопутствующих опасных метеорологических явлений применительно к территории Дальнего Востока и прилегающих морей на базе моделей WRF».

Основной целью работы являлись разработка и внедрение в оперативную практику технологии прогноза тайфунов на базе выходной продукции модели WRF и своевременное обеспечение потребителей (дальневосточных территориальных управлений Гидрометслужбы) прогностической информацией об имеющихся тропических циклонах. Созданная в ДВНИГМИ автоматизированная технология прогноза тайфунов является дальнейшим развитием разработок в области прогнозирования ТЦ, проведенных В.П. Тунеголовцем и Н.И. Павловым [2, 5]. Ранее до 2017 года в Росгидромете не было утвержденной методики прогнозирования тропических циклонов.

Название оперативной технологии HWRF-Ru предложено авторами (по аналогии с наименованием технологии COSMO), так как оно отражает название своей страны, для

однозначной локализации области численного прогноза (Дальний Восток и северо-западная часть Тихого океана), а также опций модели HWRF (физические параметризации, численные методы решения и т. д.).

Оперативные испытания технологии HWRF-Ru проводились в ДВНИГМИ по существующим в настоящее время нормативам оценок численных и общего назначения прогнозов погоды для тропических циклонов [3].

В данной статье приводятся итоги оперативных испытаний прогнозов тропических циклонов системы HWRF-Ru для северо-западной части Тихого океана и ДВ морей.

1. Система прогноза ТЦ HWRF-Ru в ДВНИГМИ

1.1. Общая характеристика модели HWRF

HWRF (сокращенная аббревиатура от Hurricane WRF-NMM) – это современная гидродинамическая модель на базе WRF-NMM, разработанная в NCEP [7]. На сайте сообщества WRF приведена подробная научно-техническая документация модели HWRF, а также руководство по применению модели.

Особенностью конфигурации модели HWRF является то, что она специально разработана для работы с ТЦ. В настоящее время при расчетах тайфунов версия модели HWRF – сборка HWRF-Ru запускается в одиночном режиме без модели океана POM.

В модели HWRF используются повернутые сферические координаты. Такие координаты используются также в моделях ETA (США, Бразилия) и в модели COSMO (Метеорологическая служба Германии, Гидрометцентр России). Эти координаты удобны тем, что при сравнительно небольших размерах области, характерных для локальных и региональных моделей, расчеты ведутся на почти равномерной (в линейном смысле) широтно-долготной сетке. Все плоские операторы, присутствующие в уравнениях, являются операторами в сферической системе координат. Концепция масштабного множителя в модели HWRF не применяется.

Расчетная область для модели HWRF-Ru состоит из материнской сетки размером примерно $80^\circ \times 80^\circ$ с шагом $0,18^\circ$ (около 27 км) и вложенной сетки приблизительно $6^\circ \times 6^\circ$ с шагом $0,06^\circ$ (около 9 км), двигающейся вслед за ТЦ (рисунок).

Основные уравнения модели HWRF приведены в [7]. Особенностью модели HWRF с ядром NMM является то, что в ней в явном виде отделены члены, присутствующие в гидростатических моделях, от членов, возникающих вследствие учета негидростатичности. В упрощенном виде система прогностических и диагностических уравнений модели WRF-NMM в σ -системе координат на плоскости, трансформированной широтно-долготной

проекции, содержит 9 уравнений и 9 неизвестных, т. е. является замкнутой. В полном виде исходная система уравнений также включает источники (стоки) в уравнениях движения и притока тепла. Также добавляются уравнения переноса влаги в различных фазовых состояниях. Численное решение системы уравнений модели WRF-NMM выполняется конечно-разностным аналогом, записанным на расштанной «Е» сетке Аракавы.

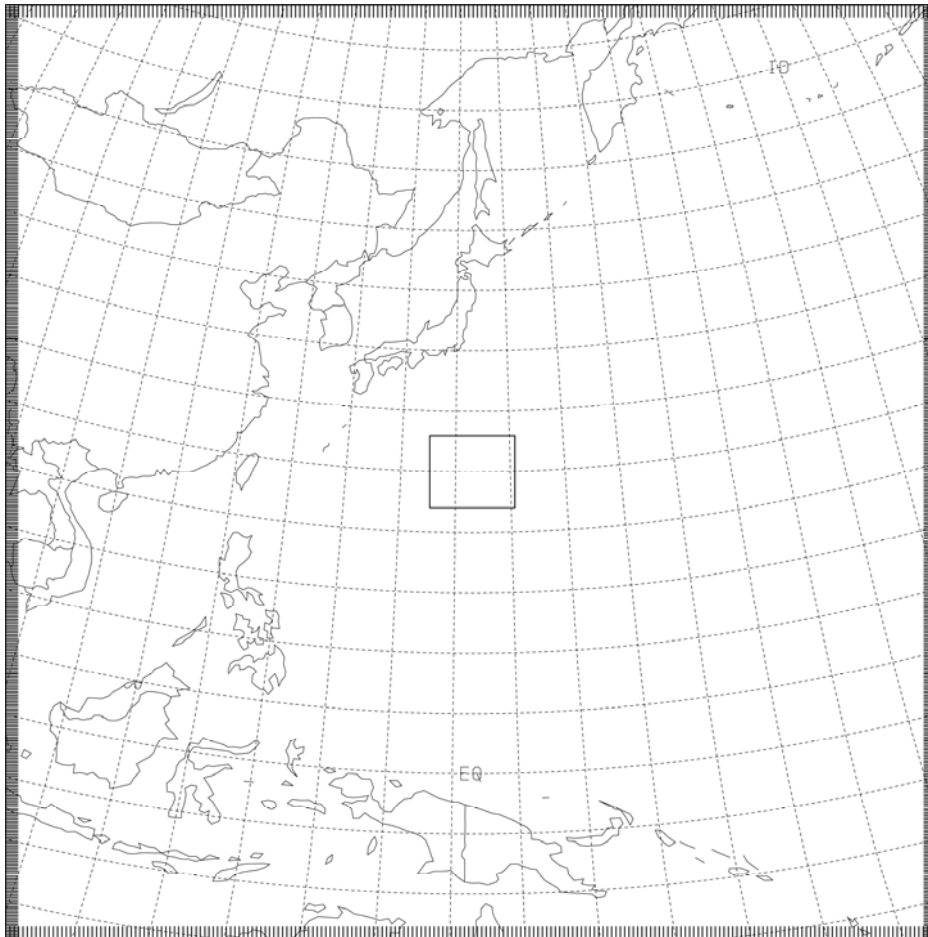


Рис. Область интегрирования системы прогноза ТЦ HWRf-Ru, функционирующей в ДВНИГМИ для северо-западной части Тихого океана и ДВ морей.

Основной набор параметризаций для модели HWRf выглядит следующим образом:

- 1) параметризация подстилающей поверхности: однослойная схема «GFDL SLAB» с постоянным коэффициентом теплопроводности;
- 2) параметризация приземного слоя: схема по Монину – Обухову с масштабом шероховатости по Зилитинкевичу;
- 3) параметризация планетарного пограничного слоя: схема высокого разрешения GFS PBL с неявным представлением слоя вовлечения как части нелокального по К-слою смешения;

4) глубокая конвекция параметризуется на основе подхода «потока массы» по Аракаве – Шуберту;

5) схема параметризации для микрофизических процессов Феррье, описывающая многофазные процессы в облаках;

6) коротко- и длинноволновая радиация параметризуется схемой GFDL.

Шаг по времени равен 54 сек. Потоки коротковолновой и длинноволновой радиации в экспериментах рассчитываются каждые 30 мин.

В версии модели HWRF, используемой в ДВНИГМИ, применяется инициализация вихря ТЦ при холодном старте. В технической документации модели HWRF для определения получившегося вихря применяется термин «композиционный вихрь» (composite vortex). На основании данных положения и интенсивности ТЦ, получаемых по результатам самолетного и дистанционного зондирования, производится поиск параметров вихря в полях первого приближения (guess fields) – крупномасштабных метеорологических полях объективного анализа, полученных по результатам работы глобальной модели (оперативный прогноз или повторный анализ). Под термином параметры вихря здесь понимается информация об интенсивности и положении ТЦ. Завершается инициализация ТЦ проведением коррекции размера композиционного вихря на основании фактических данных о ТЦ – скорости и радиусе максимального ветра и, по возможности, радиусе внешней замкнутой изобары. Получившийся вихрь в полной мере удовлетворяет физике и динамике модели при соблюдении соответствия фактическим значениям минимального давления в центре ТЦ, максимального ветра и радиуса максимальных ветров. Вихрь не подвергается инициализации или (и) перемещению в случае, если он находится над сушей.

Отслеживание прогностического положения ТЦ и определение его интенсивности производится по программе, разработанной в GFDL, являющейся составной частью постпроцессинга модели HWRF [7]. Метод отслеживания вихря ТЦ реализует объективную процедуру получения прогностических параметров ТЦ (координаты и параметры интенсивности) из набора полей (относительная завихренность, геопотенциал, давление на уровне моря и компоненты скорости ветра в окрестности ТЦ), являющихся выходной продукцией численной модели HWRF. Результатом работы программы отслеживания вихря ТЦ является текстовая телеграмма в международном формате ATCF. По умолчанию, в версии модели HWRF, используемой в ДВНИГМИ, вывод прогностических параметров происходит с дискретностью 3 часа. В ATCF-формате на один прогностический срок может приходиться от одной до трех строк, в зависимости от интенсивности ТЦ. В строке все параметры отделяются друг от друга запятой и пробелом.

Текстовая телеграмма ATCF содержит информацию о районе прогноза, номере ТЦ, идентификаторе модели, начальной дате – времени прогноза, заблаговременности (час), а также различную информацию о координатах, интенсивности и радиусах штормовых ветров. Более полное развернутое описание ATCF-формата дано в [7].

1.2. Организация прогнозов ТЦ в ДВНИГМИ

К настоящему времени на вычислительных средствах Росгидромета в ДВНИГМИ функционирует система прогноза ТЦ HWRF-Ru для территории северо-западной части Тихого океана и ДВ морей (см. рисунок).

Система прогноза ТЦ HWRF-Ru в ДВНИГМИ была впервые задействована в экспериментальном режиме с сентября 2012 г. для обеспечения гидрометеорологической безопасности проведения саммита глав государств-участников АТЭС на о. Русский (Владивосток). Технология находится в оперативной эксплуатации на вычислительных ресурсах отдела автоматизации ДВНИГМИ с мая 2013 года.

В настоящее время система краткосрочного прогноза ТЦ HWRF-Ru использует версию 3.3.1 модели HWRF, версию 2.2.0 постпроцессинга и версию 3.4а трекинга ТЦ. Система препроцессинга WPS регулярно актуализируется в соответствии с обновлением ассортимента выходной продукции модели GFS.

Для нахождения начальных и боковых граничных условий используются прогнозы глобальной модели GFS пространственным разрешением $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$ [8].

В качестве начальной информации о ТЦ в системе HWRF-Ru используется оперативная историческая информация по положению и интенсивности ТЦ из текстовых телеграмм Объединенного центра предупреждения о тайфунах США (Joint Typhoon Warning Centre, JTWC), оперативно обновляющихся (каждые 6 часов: 00, 06, 12, 18 ч ВСВ) на серверах Глобальной системы прогнозов Национального центра экологического прогноза США.

Расчеты прогнозов тайфунов выполняются на вычислительных ресурсах ДВНИГМИ два раза в сутки от 00 и 12 ч ВСВ. Расчет характеристик успешности прогнозов ТЦ осуществляется в конце года на основе разработанных программ.

Подсистема выпуска прогностической продукции включает:

– прогностические поля метеорологических элементов у Земли и на изобарических поверхностях по северо-западной части Тихого океана на период 72 ч с интервалом 3 ч в графическом и бинарном виде. Карты основных метеорологических элементов: давление на уровне моря, 3-часовые накопленные суммы осадков, данные о высоте геопотенциальных поверхностей 1000, 850, 700 гПа и т.д. размещены на сайте ДВНИГМИ (<http://www.ferhri.ru>);

– текстовые прогностические телеграммы в формате ATCF (Automated Tropical Cyclone Forecast);

– специализированные прогнозы ТЦ в графическом и бинарном виде предоставляются всегда и доступны на сайте ДВНИГМИ.

Выходная прогностическая информация фиксируется на серверах ДВНИГМИ. Кроме того, ссылка на прогнозы тропических циклонов системы HWRF-Ru по северо-западной части Тихого океана и ДВ морям размещена на web-сервере ФГБУ «Приморское УГМС».

2. Оценка успешности численных краткосрочных прогнозов характеристик ТЦ системой HWRF-Ru

2.1. Методика оценки успешности прогнозов ТЦ

Для определения качества прогноза перемещения ТЦ, в соответствии с [3], вычислялись показатели, характеризующие ошибки прогноза положения центра ТЦ, скорости и направления его перемещения.

Допустимые ошибки прогнозов перемещения ТЦ для заблаговременностей 24, 48 и 72 ч представлены в табл. 1.

В табл. 1, согласно [3], приняты следующие обозначения:

– Δr – абсолютные ошибки прогноза положения центра ТЦ (расстояние между фактическим и прогностическим положениями центров в срок прогноза);

– ΔS – абсолютная ошибка прогноза скорости перемещения ТЦ;

– $\Delta \varphi$ – ошибка прогноза направления перемещения, определяемая значением угла между фактической и прогностической траекториями ТЦ (в пределах от 0 до 180° вправо или влево).

Основными показателями успешности прогнозов перемещения ТЦ принято считать ошибки в прогнозе положения ТЦ (Δr).

В дополнение к расчету успешности качества прогнозов перемещения ТЦ в ходе оперативных испытаний также рассчитывалось и качество прогнозов эволюции ТЦ. Для установления надежности методов прогноза эволюции ТЦ использовались, в том числе, такие статистические показатели успешности прогнозов давления в центре ТЦ и максимального ветра, как абсолютная и относительная ошибки прогноза.

Оценка оправдываемости прогноза максимального ветра в циклонах производилась с использованием тех же характеристик, что и оценка оправдываемости прогноза давления в центре ТЦ.

Таблица 1. Допустимые ошибки прогнозов перемещения тропических циклонов

Качество прогноза	Δr , км	ΔS , км/сут	$\Delta\varphi^\circ$
Заблаговременность 24 ч			
Хорошее	< 200	< 250	< 20
Удовлетворительное	201–400	251–450	21–35
Неудовлетворительное	> 400	> 450	> 35
Заблаговременность 48 ч			
Хорошее	< 350	< 350	< 30
Удовлетворительное	351–550	351–450	31–40
Неудовлетворительное	> 550	> 450	> 40
Заблаговременность 72 ч			
Хорошее	< 500	< 450	< 30
Удовлетворительное	501–700	451–650	31–45
Неудовлетворительное	> 700	> 650	> 45

Согласно [3], испытание новых методов прогноза перемещения и эволюции ТЦ производится в сравнении с другими расчетными методами аналогичного прогноза, а также в сравнении с инерционным прогнозом первого порядка. Инерционный прогноз представляет собой линейную экстраполяцию движения и других характеристик ТЦ на последующий период времени.

В связи с требованиями [3], а также в связи с большими различиями в физико-географических и климатических условиях развития и перемещения тропических циклонов северо-западной части Тихого океана, зафиксированных на рассматриваемой территории, оценки рассчитывались как в среднем по всей территории, так и по районам южнее и севернее 25° с. ш.

В следующем разделе кратко представлены основные результаты оперативных испытаний прогнозов перемещения и эволюции ТЦ системой HWRF-Ru. Полное описание результатов испытаний приведено в соответствующем отчете [1].

2.2. Оценки успешности прогнозов характеристик ТЦ

Всего за период оперативных испытаний 2014–2016 гг. было обчислено 68 ТЦ, что составило 90 % от 76 ТЦ, отмечавшихся в северо-западной части Тихого океана. Это обстоятельство позволяет считать полученные прогностические оценки репрезентативными. Результаты оперативных испытаний сведены в 15 таблиц, представленных в [1]. Из-за большого их объема в настоящей статье эти таблицы не приводятся, а дается краткий анализ результатов испытаний.

2.2.1. Прогноз положения тропических циклонов

При любой заблаговременности прогнозов положения ТЦ численный метод дает хороший результат.

Средняя ошибка прогнозов положения центров ТЦ при заблаговременности прогнозов до 24 ч не превышает 101 км при нахождении циклона на момент прогноза к югу от 25° с. ш. и 95 км при нахождении циклона на момент прогноза к северу от 25° с. ш.; при заблаговременности 48 ч – 188 и 179 км, при заблаговременности 72 ч – 259 и 341 км, соответственно, к югу и северу от 25° с. ш.

При заблаговременности прогнозов до 48 ч в большинстве случаев ошибка прогноза положения при нахождении циклона на момент прогноза к югу от 25° с. ш. не превышает 156 км (от 99 % при заблаговременности 12 ч до 59 % при заблаговременности 48 ч). При нахождении циклона на момент прогноза к северу от 25° с. ш. она изменяется от 93 % при заблаговременности 12 ч до 69 % при заблаговременности 48 ч. При большей заблаговременности возрастает число случаев, когда эта ошибка превышает 200 км. В среднем разница между прогностическим и фактическим положением тропических циклонов находится в интервале 201–400 км.

Минимальная величина ошибки положения составляет примерно одну десятую градуса для всех заблаговременностей прогноза. Максимальное значение ошибки (707 км) приходится на прогнозы сезона 2014 года с заблаговременностью 60–72 ч при нахождении циклона на момент прогноза к югу от 25° с. ш. и 965 км для заблаговременности 72 ч при нахождении циклона на момент прогноза к северу от 25° с. ш.

Относительная ошибка положения ТЦ с увеличением заблаговременности Δt от 24 до 72 ч меняется незначительно, с тенденцией слабого уменьшения. Максимальные значения характерны для первых часов прогноза (0,30–0,43). По мере увеличения заблаговременности относительная ошибка положения ТЦ стабилизируется (0,23–0,27).

Большие ошибки прогноза положения ТЦ при нахождении циклона на момент прогноза к северу от 25° с. ш. по сравнению с ошибками прогноза положения ТЦ при нахождении циклона на момент прогноза к югу от 25° с. ш., предположительно, могут быть объяснены тем фактом, что скорость перемещения ТЦ по мере своего перемещения на север, как правило, значительно увеличивается.

2.2.2. Прогноз скорости перемещения тропических циклонов

Анализ результатов показывает, что при любой заблаговременности прогнозов численный метод прогнозов скорости перемещения ТЦ имеет хорошее качество. При всех

заблаговременностях прогнозов в подавляющем большинстве случаев (99–100 % при нахождении циклона на момент прогноза к югу от 25° с. ш. и 93–98 % при нахождении циклона на момент прогноза к северу от 25° с. ш.) ошибка прогноза скорости перемещения тропических циклонов не превышает 250 км/сут.

Скорость перемещения ТЦ систематически занижается от 38 до 8 км/сут. при нахождении циклона на момент прогноза к югу от 25° с. ш. и от 74 до 31 км/сут при нахождении циклона на момент прогноза к северу от 25° с. ш.

2.2.3. Прогноз направления перемещения тропических циклонов

Погрешность определения направления смещения тропических циклонов при любой заблаговременности прогнозов, включительно до 72 ч, в большинстве случаев (от 79 до 91 % при нахождении циклона на момент прогноза к югу от 25° с. ш. и от 93 до 100 % при нахождении циклона на момент прогноза к северу от 25° с. ш.) не превышает 25°.

Средний показатель угла отклонения прогностической траектории от фактической при любой заблаговременности прогнозов равен 4–6°. Чаще всего (от 50 до 65 % случаев) прогностические траектории отклоняются от фактических вправо при нахождении циклона на момент прогноза к югу от 25° с. ш. и влево (от 50 до 55 %) при нахождении циклона на момент прогноза к северу от 25° с. ш. Максимальные значения ошибок, в том числе более 35°, по направлению отмечаются в первые 12 ч.

Таким образом, правый поворот относительно истинной траектории преобладает в течение всего периода прогноза системы HWRF-Ru.

2.2.4. Прогноз минимального давления в тропических циклонах

Абсолютная ошибка прогнозов давления при нахождении циклона на момент прогноза к югу от 25° с. ш. с увеличением заблаговременности растет от 7,5 до 27,3 гПа. Средняя арифметическая ошибка прогноза положительна при нахождении циклона на момент прогноза к югу от 25° с. ш., отрицательна при нахождении циклона на момент прогноза к северу от 25° с. ш. В целом, имеет место занижение величины прогноза давления, особенно значительное на третьи сутки прогноза.

Относительная ошибка метода с увеличением заблаговременности, как правило, уменьшается при нахождении циклона на момент прогноза к югу от 25° с. ш. или остается без существенного изменения при нахождении циклона на момент прогноза к северу от 25° с. ш.

При любой заблаговременности прогнозов численный метод прогнозов давления в центре ТЦ имеет удовлетворительное качество.

2.2.5. Прогноз максимального ветра в тропических циклонах

Средняя арифметическая ошибка прогнозов максимального ветра для всех заблаговременностей при нахождении циклона на момент прогноза к югу от 25° с. ш., как правило, отрицательна. Следовательно, имеет место занижение прогноза максимального ветра.

Средняя арифметическая ошибка при нахождении циклона на момент прогноза к северу от 25° с. ш. с увеличением заблаговременности изменяется от -5 м/с (на 12 ч) до -25 м/с (на 72 ч). При этом, занижение скорости максимального ветра в прогнозах больше характерно при нахождении циклона на момент прогноза к югу от 25° с. ш.

Анализ качества инерционных прогнозов максимальной скорости ветра показывает преимущество методических численных прогнозов при нахождении циклона на момент прогноза к северу от 25° с. ш.

2.3. Статистическая оценка преимущества методического прогноза системы HWRF-Ru над инерционным

Для проверки значимости преимущества методических прогнозов положения ТЦ системы HWRF-Ru был применен статистический t-критерий Стьюдента [8].

Если отрицательное значение t-статистики меньше соответствующего критического значения на выбранном уровне значимости (обычно 5 %), то это говорит о преимуществе методического прогноза над инерционным.

Таблица 2. Оценка статистической значимости преимущества методических прогнозов ТЦ перед инерционными прогнозами по статистическому t-критерию Стьюдента [8] за весь период оперативных испытаний 2014-2016 гг.

Заблаговременность, ч	Число прогнозов	Число тайфунов	Значение t-статистики по Стьюденту (критическое значение t-статистики при уровне значимости 5 %)		
			Ошибка положения центра ТЦ	Средняя абсолютная ошибка скорости перемещения ТЦ	Средняя абсолютная ошибка направления перемещения ТЦ
24	523	68	-18,78 (-1,97)	-4,53 (-1,97)	-5,77 (-1,97)
48	428		-18,01 (-1,97)	-3,50 (-1,97)	-8,35 (-1,97)
72	335		-16,34 (-1,98)	-1,27 (-1,98)	-8,52 (-1,98)

Данные табл. 2 подтверждают, что на уровне значимости 5 % ошибки методических прогнозов положения ТЦ значимо меньше, чем ошибки инерционного. Также становится ясно, что наилучшим образом удаются прогнозы положения ТЦ, на втором месте по качеству идут прогнозы направления перемещения, и на последнем месте – прогнозы скорости перемещения ТЦ.

Оценка качества методических прогнозов интенсивности ТЦ удовлетворительная, в большинстве случаев имеет место занижение прогноза давления в центре ТЦ при нахождении циклона на момент прогноза к северу от 25° с. ш., и завышение – при нахождении циклона на момент прогноза к югу от 25° с. ш. Максимальная скорость ветра в центре ТЦ занижается на сравнительно постоянную величину для каждой заблаговременности.

2.4. Сравнение методических прогнозов системой HWRF-Ru с официальными прогнозами ТЦ ведущих мировых метеорологических агентств

Для оценки качества прогноза положения ТЦ проведено их сопоставление с официальными синоптическими прогнозами по данным Японского Метеорологического Агентства (JMA) и Объединенного центра предупреждения о тайфунах США (Joint Typhoon Warning Centre, JTWC) для северо-западной части Тихого океана, а также с комплексным методом ДВНИГМИ (табл. 3, 4).

Таблица 3. Сравнение средней ошибки прогноза положения центра ТЦ разными методами

Метод	Заблаговременность (час)		
	24	48	72
2014 г.			
Метод HWRF-Ru (опер. испытания)	98	188	273
Синоптический метод JMA	101	177	249
Синоптический метод JTWC	91	152	228
2015 г.			
Метод HWRF-Ru (опер. испытания)	87	150	218
Синоптический метод JMA	72	119	176
Синоптический метод JTWC	78	124	181

Анализ табл. 3 показывает, что численный метод системы HWRF-Ru прогноза положения центра ТЦ на период до 48 ч вполне сравним по качеству с оправдываемостью синоптических методов прогноза положения ТЦ ведущих мировых метеорологических агентств (JMA и JTWC) со специализацией деятельности в области тропических циклонов.

Ввиду большой изменчивости ошибок прогноза положения ТЦ от года к году, была составлена сводная табл. 4, содержащая итоговые осредненные за период ошибки положения ТЦ. Для мировых метеорологических агентств принят период 5 лет. Оценки по методу HWRF-Ru усреднены за три года оперативных испытаний. Для сравнения приведены оценки комплексного физико-статистического метода В.П. Тунеголовца для сезона 2009 года [5].

Таблица 4. Сводная таблица средней ошибки положения центра ТЦ (км) разными методами

Метод	Период оценки, год	Заблаговременность (час)		
		24	48	72
Численный метод HWRF-Ru	2014–2016	91	170	258
Официальные оценки Японского Метеорологического Агентства (JMA)	2011–2015	87	143	210
Официальные оценки Объединенного центра предупреждения о тайфунах США (JTWC)	2011–2015	96	167	244
Инерционный прогноз 1 рода	2014–2016	384	468	496
Комплексный физико-статистический метод (автор В. П. Тунеголовец, ДВНИГМИ, 2010)	2009	133	216	352

В соответствии с методическими указаниями [3], оправдываемость полностью автоматизированного метода прогноза положения центра ТЦ версией модели HWRF, использующейся в ДВНИГМИ, оценивается как хорошая.

Выводы

Численный метод прогноза положения тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана системы HWRF-Ru при нахождении циклона на момент прогноза как к югу, так и к северу от 25° с. ш. позволяет с большой вероятностью рассчитывать будущее положение тропических циклонов с заблаговременностью до 72 ч включительно.

По всем показателям успешности метод имеет преимущество перед инерционными прогнозами. Отмечается некоторое занижение прогностической скорости смещения ТЦ по сравнению с фактической. Направление смещения ТЦ прогнозируется хорошо, качество прогнозов практически не меняется с увеличением заблаговременности прогнозов, при этом преобладает повторяемость отклонения прогностических траекторий вправо, вне зависимости от нахождения циклона на момент прогноза к югу или к северу от 25° с. ш.

Основные положения метода прогноза положения тропических циклонов северо-западной части Тихого океана численной региональной моделью HWRF и результаты испытаний (изложенные выше) реализующей его технологии HWRF-Ru докладывались на Ученом Совете ФГБУ «ДВНИГМИ» 2 марта 2017 г., на Техническом Совете ФГБУ

«Приморское УГМС» 4 апреля 2017 г. и на заседании Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета 20 июня 2017 года [4].

ЦМКП Росгидромета рекомендовала, в том числе:

– внедрить автоматизированный метод краткосрочного (с заблаговременностью до 72 ч) прогноза положения тропических циклонов северо-западной части Тихого океана в составе выходной продукции численной региональной модели HWRF в ФГБУ «ДВНИГМИ» и для практического применения в оперативно-прогностической работе ДВ управлений Росгидромета, а также в Дальневосточном и Камчатском филиалах ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» в качестве **основного метода**;

– прогноз интенсивности ТЦ может использоваться в качестве **консультативного прогноза**;

– авторам продолжить работу по совершенствованию автоматизированной технологии краткосрочного (с заблаговременностью до 72 ч) прогноза положения и интенсивности тропических циклонов (ТЦ) и методов прогноза элементов и явлений погоды в окрестностях тропических циклонов по северо-западной части Тихого океана с учетом физико-географических и климатических особенностей рассматриваемого региона, включая вопрос об увеличении заблаговременности прогноза.

115

Благодарности

Работа выполнена благодаря неоценимой помощи сотрудников ФГБУ «ДВНИГМИ», коллег из ФГБУ «Хабаровский ЦГМС-РСМЦ» и кафедры океанологии и гидрометеорологии школы естественных наук ДВФУ. Всем им выражаем нашу искреннюю благодарность и признательность.

Список литературы

1. *Отчет* по испытаниям автоматизированного метода краткосрочного (с заблаговременностью до 72 часов) прогноза положения тропических циклонов северо-западной части Тихого океана численной региональной моделью HWRF (ДВНИГМИ, отв. исполн. В.В. Крохин). – Владивосток: ДВНИГМИ, 2017. – 55 с.
2. *Павлов Н.И.* Тайфуны северо-западной части Тихого океана: дисс. ... д-ра геогр. наук: 11.00.08. – Владивосток, 1998. – 295 с. – РГБ ОД, 71 99-11/19-5.

3. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 150 с.

4. *Решение* Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам от 20 июня 2017 г. 1. Автоматизированный метод краткосрочного (с заблаговременностью до 72 часов) прогноза положения тропических циклонов северо-западной части Тихого океана численной региональной моделью HWRF (ФГБУ «ДВНИГМИ», В.В. Крохин). – М.: Росгидромет, 2017.

5. *Тунеголовец В.П., Сиротенко М.В.* Результаты испытания комплексного метода прогноза перемещения и интенсивности тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана с заблаговременностью до 72 ч // Информационный сборник № 38. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2011. – С. 31–45.

6. *Goerss J.S., Jeffries R.A.* Assimilation of synthetic tropical cyclone observations into the Navy operational global atmospheric prediction system [Текст] // *Wea. Forecasting.* – 1994. – Vol. 9, no 4. – P. 557–576.

7. *Gopalakrishnan S., Liu Q., Marchok T, Gopalakrishnan S. et al.* Hurricane Weather Research and Forecasting (HWRF) Model: 2016 Scientific Documentation.

8. *McClung T.* Global Forecast System: Technical Implementation Notice 16–11 Amended. Nation Weather Service. Archived from the original on 5 June 2016. Retrieved 5 June 2016 [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.nws.noaa.gov/os/notification/tin16-11gfs_gdasaaa.htm.

МЕТОД ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ В ТАТАРСКОМ ПРОЛИВЕ, ОХОТСКОМ И БЕРИНГОВОМ МОРЯХ, ОСНОВАННЫЙ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Введение

В соответствии с Планом испытания и внедрения новых и усовершенствованных методов (технологий) гидрометеорологических прогнозов на 2017 г. в ФГБУ «Гидрометцентр России» были проведены оперативные испытания нового метода долгосрочного прогноза ледовых условий. В рамках развития данной технологии ранее были испытаны методы прогноза ледовых условий в Баренцевом, Белом, Азовском и Каспийском морях, Финском заливе. ЦМКП в 2011 и 2014 гг. одобрила результаты испытаний и рекомендовала включить данные методы в практику составления ледовых прогнозов в качестве основных. В 2017 году на обсуждение Центральной методической комиссии по прогнозам (ЦМКП) Росгидромета был вынесен последний фрагмент данной технологии – метод прогноза ряда ледовых характеристик на дальневосточных морях. Метод также был рекомендован для включения в практику составления ледовых прогнозов в качестве основного.

В качестве зависимых рядов данных для получения расчетных уравнений использовались наиболее полные ряды наблюдений за ледовыми характеристиками (различные по длине для разных ледовых характеристик: от 50 до 100 лет) до ледового сезона 2009/2010 гг. В качестве независимого ряда данных, принятого к испытаниям, использовались данные семи ледовых сезонов: с 2009/2010 по 2015/2016 гг.

В отделе морских прогнозов Гидрометцентра России составляется долгосрочный прогноз ледовых условий на российских морях на предстоящую зиму. Прогнозируется ряд характеристик по пунктам неарктических морей (в том числе Охотского моря, Татарского пролива, Берингова моря): сумма градусодней мороза (СГДМ); первое появление льда (ПП); максимальная за ледовый сезон средняя месячная ледовитость моря (МЛ); максимальная за

ледовый сезон толщина припайного льда (МТ); дата окончательного очищения моря ото льда (ОО); продолжительность ледового периода (ЛП).

Долгосрочный прогноз ледовых характеристик ежегодно в начале октября публикуется в бюллетене «Долгосрочный прогноз ледовых условий на неарктических морях на предстоящий ледовый сезон», который рассылается пользователям.

1. Используемые данные наблюдений

Информационной основой испытываемого метода долгосрочного прогноза ледовых условий на дальневосточных морях являются данные электронного архива метеорологической и ледовой информации, формируемого в лаборатории ледовых прогнозов Гидрометцентра России (табл. 1).

Таблица 1. Данные о периодах наблюдений за метеорологическими и ледовыми характеристиками, использованными при разработке метода прогноза

Море	Район моря или пункт наблюдений	Характеристика	Период наблюдений, годы	Число лет в периоде наблюдений	Пропуски данных в используемых периодах, %
Берингово море	Эгвекинот	СГДМ	1937–2016	80	6
		ЛФ	1927–2016	90	22
		ТЛ	1936–2016	81	19
	Анадырь	СГДМ	1899–2016	118	8
		ЛФ	1926–2016	91	25
		ТЛ	1963–2016	54	24
	Петропавловск-Камчатский	СГДМ	1930–2016	87	0
Петропавловский маяк	ЛФ	1910–2016	107	19	
Все море	Л	1960–2016	57	0	
Охотское море	Магадан	СГДМ	1932–2016	85	0
		ЛФ	1929–2016	88	3
	Охотск	СГДМ	1926–2016	91	0
		ЛФ	1927–2016	90	2
	Аян	ТЛ	1934–2016	83	10
Все море	Л	1950–2016	67	1	
Японское море	Советская гавань	СГДМ	1911–2016	106	2
		ЛФ	1925–2016	92	3
		ТЛ	1929–2016	88	14
	Татарский пролив	Л	1951–2016	66	0
Среднее				87	8

Примечание. СГДМ – сумма градусодней мороза, ЛФ – ледовые фазы, ТЛ – толщина припайного льда, Л – ледовитость.

При разработке метода прогноза использовались:

– данные наблюдений за среднемесячной температурой воздуха у поверхности Земли на метеорологических станциях, характеризующей термическое состояние воздушных масс:

причерноморской (Ростов-на-Дону), сибирской (Иркутск), берингоморской (о. Беринга), воздушной массы Охотского моря (Александров-Сахалинский);

– данные наблюдений за приземным давлением в пунктах, расположенных в районах центров действия атмосферы (ЦДА): алеутского минимума (о. Беринга), сибирского максимума (Иркутск), исландского минимума (Рейкьявик) и азорского максимума (Понта-Делгада);

– таблицы дат наступления ледовых фаз, продолжительности ледовых периодов и толщин припайного льда, составленные по данным наблюдений морских гидрометеорологических станций (ГМС); информация о рядах наблюдений приведена в табл. 1;

– таблицы ледовитости дальневосточных морей; информация о рядах наблюдений приведена в табл. 1.

Длина рядов данных о параметрах всех центров действия атмосферы и термическом состоянии воздушных масс составляет 120 лет, за исключением алеутского минимума, для которого удалось найти данные лишь с 1910 года (длина ряда составляет 107 лет).

В рядах метеорологических и ледовых характеристик, информация о которых приводится в табл. 1, имеются пропуски. При разработке метода принимались во внимание только те ряды, для которых количество пропусков не превышает 25 % ряда.

2. Технология долгосрочного прогноза

Испытанный метод является физико-статистическим методом, опирающимся на предположение о преемственности и цикличности процессов, происходящих в природе [1, 2]. Ледовые процессы на всех морях связаны со спецификой макроциркуляционных атмосферных процессов [3], которые, в свою очередь, зависят от состояния центров действия атмосферы в месяцы, предшествующие ледовому сезону [4, 6–8].

В основу методики прогноза заложено предположение о том, что на будущую суровость зимы и значения ледовых характеристик в любом порту европейской части России влияют состояние, интенсивность и взаимодействие крупных термобарических атмосферных структур; положение пункта прогноза относительно центров этих структур; наличие накладывающихся друг на друга циклов, определяемых внешним (космическим) воздействием.

Общие принципы составления долгосрочного прогноза для неарктических морей подробно изложены в ряде источников [5, 9–14]. Технология прогноза представляет собой ансамблевый метод, включающий три компонента для расчета ледовых параметров.

1. Расчет по уравнениям множественной корреляции на основе использования поля приземной температуры воздуха над евроатлантическим сектором.

2. Расчет по уравнениям множественной корреляции на основе использования характеристик поля приземного давления над евроатлантическим сектором.

3. Разложение кривых хода межгодовой изменчивости ледовых параметров на гармонические составляющие с последующей экстраполяцией их сумм на предстоящий ледовый сезон.

В окончательном прогнозе ледовых характеристик учитывается вклад каждого из трех компонентов. Величина этого вклада в общий результат пропорциональна обеспеченности расчета в рамках каждого компонента. При разработке метода прогноза для дальневосточных морей исследовалась связь характеристик ледового режима этих морей с параметрами атмосферных процессов:

– среднемесячными значениями приземной температуры воздуха, характеризующими причерноморскую, сибирскую, берингоморскую воздушные массы и воздушную массу Охотского моря, а также разностями этой температуры на фиксированных створах ΔT_1 , ΔT_2 , ΔT_3 (см. табл. 2);

– среднемесячными значениями приземного давления в центрах действия атмосферы и разностями этих значений на фиксированных створах ΔP_1 , ΔP_2 , ΔP_3 (см. табл. 2).

Корреляционный анализ осуществлялся по данным девяти месяцев, предшествующих ледовому сезону (с января по сентябрь включительно). Ограничение набора предикторов данными за сентябрь было определено тем, что результаты прогноза публикуются в бюллетене в начале октября. По результатам анализа были выбраны наиболее значимые предикторы, которые и вошли в уравнения.

Набор предикторов, использованный для ледового прогноза в дальневосточных морях, отличается от предикторов, выбранных ранее для европейских морей [11–13]. В расчет добавлены данные о давлении в районе о. Беринга (характеризующем состояние алеутского минимума) и температуре в районе о. Беринга и Александра-Сахалинского, характеризующей термическое состояние Берингоморской воздушной массы и воздушной массы Охотского моря. Выбор именно этих ГМС определяется в значительной мере длиной имеющихся рядов наблюдений, которая по условию разработки прогноза должна составлять не менее 100 лет. Таких рядов в районе дальневосточных морей крайне мало.

Уравнения для всех пунктов имеют аналогичный вид, отличаясь весовыми коэффициентами. Число весовых коэффициентов, отличных от нуля, в каждом уравнении не превышает 20 % ряда рассчитываемой ледовой характеристики. Линейное корреляционное уравнение имеет вид:

$$y = A_i (B_1 x_1 + B_2 x_2 + \dots + B_n x_n) + C_i, \quad (1)$$

где B_1, B_2, \dots, B_n – весовые коэффициенты; A_i и C_i , – коэффициенты в линейном уравнении для i -го элемента ледового режима (номер года, сумма градусодней мороза, дата начала ледообразования, максимальная за ледовый сезон ледовитость моря, максимальная за ледовый сезон толщина льда, дата очищения моря ото льда).

В табл. 2 приведены предикторы (x) для расчета ледовых характеристик по полям приземной температуры и приземного давления.

Таблица 2. Предикторы (x), характеризующие поля приземной температуры (ППТ) и приземного давления (ППД) в уравнениях расчета ледовых характеристик для дальневосточных морей

Объект ППТ	x для ППТ	Объект ППД	x для ППД
Номер года	N_G	Номер года	N_G
Причерноморская воздушная масса	T_P	Исландский минимум	P_i
Сибирская воздушная масса	$T_{Ир}$	Сибирский максимум	P_c
Берингоморская воздушная масса	T_B	Азорский максимум	$P_{аз}$
Воздушная масса Охотского моря	$T_{АСх}$	Алеутский минимум	$P_{ал}$
Зональный градиент температуры (ΔT_1)	$T_{Ир} - T_{АСх}$	Зональный градиент давления (ΔP_1)	$P_c - P_i$
Зональный градиент температуры (ΔT_2)	$T_{Ир} - (T_{АСх} + T_B)/2$	Зональный градиент давления (ΔP_2)	$P_i - P_{ал}$
Меридиональный градиент температуры (ΔT_3)	$T_{АСх} - T_B$	Меридиональный градиент давления (ΔP_3)	$P_{аз} - P_i$

Примечание. Предикторы:

- среднемесячная приземная температура воздуха в пункте, характеризующем теплозапас воздушной массы: T_P – в Ростове-на-Дону, $T_{Ир}$ – в Иркутске, T_B – на о. Беринга, $T_{АСх}$ – в Александрове Сахалинском;
- приземное давление в районе соответствующего центра действия атмосферы: P_i – в Рейкьявике, P_c – в Иркутске, $P_{аз}$ – в Понта-Делгада, $P_{ал}$ – на о. Беринга.

Для третьего компонента прогноза было сделано предположение, что в пределах обширных территорий планетарного масштаба изменчивость природных явлений должна быть подвержена влиянию тех же циклов (являющиеся вероятно результатом внешнего гравитационного воздействия), параметры которых были использованы ранее для прогноза ледовых условий в европейских морях России. Периоды циклов определялись по ряду приземной температуры воздуха в Санкт-Петербурге, для которого имеется наибольшее число наблюдений. Разложению на гармоники подвергался 200-летний ряд отклонений СГДМ от генерального тренда (с ледового сезона 1805/1806 гг. по сезон 2004/2005 гг.) При этом генеральный тренд также описывался длиннопериодной гармоникой, наиболее близко

соответствующей полиномиальному тренду 2-го порядка [11, 13]. После 2005 года прошло более 10 лет, и мы имеем возможность оценить устойчивость работы гармоник. В табл. 3 приведены параметры для 31 гармоник, сумма которых аппроксимирует СГДМ в Санкт-Петербурге, а также коэффициенты корреляции (r) для ряда, оканчивающегося в 2005 году, и для ряда, оканчивающегося в 2016 году. Для первого ряда средний коэффициент корреляции равен 0,14, суммарный – 0,80, для второго ряда средний коэффициент корреляции равен 0,13, суммарный – 0,78. Анализ табл. 3 свидетельствует о низкой устойчивости гармоник с малыми значениями частных коэффициентов корреляции (до 0,1 включительно), в то время как более значимые гармоники в целом сохранили свои позиции.

Таблица 3. Периоды гармоник (Δt) и коэффициенты корреляции (r) для гармоник

№ гармоники	Δt , годы	r на 2005 г.	r на 2016 г.	№ гармоники	Δt , годы	r на 2005 г.	r на 2016 г.
1 (ген. тренд)	1008,80	0,40	0,44	16	5,30	0,13	0,13
				17	5,05	0,16	0,14
2	173,93	0,07	0,08	18	4,92	0,14	0,15
3	84,07	0,12	0,11	19	4,66	0,10	0,10
4	25,47	0,10	0,07	20	4,37	0,13	0,12
5	21,74	0,18	0,18	21	4,23	0,10	0,10
6	18,14	0,10	0,05	22	3,94	0,18	0,18
7	13,56	0,10	0,10	23	3,38	0,13	0,14
8	12,67	0,11	0,10	24	3,08	0,17	0,17
9	11,21	0,14	0,14	25	2,83	0,14	0,15
10	9,78	0,17	0,13	26	2,69	0,10	0,10
11	9,27	0,18	0,16	27	2,59	0,12	0,12
12	7,84	0,20	0,21	28	2,40	0,17	0,18
13	7,57	0,05	0,05	29	2,34	0,12	0,12
14	6,48	0,07	0,11	30	2,26	0,24	0,22
15	5,65	0,10	0,07	31	2,03	0,18	0,18
Суммарный коэффициент корреляции r						0,80	0,78

В [13] было показано, что для европейских морей коэффициенты корреляции между рядами значений, рассчитанных по суммам гармоник, и соответствующими рядами фактических значений (для разных ледовых характеристик и пунктов) варьируют от 0,6 до 0,8. Было также обращено внимание на близость периодов отдельных найденных гармоник с периодами колебания гравитационных воздействий (орбитальных периодов) Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна, а также с основными циклами солнечной активности.

В [14] показано, что коэффициенты корреляции между рядами значений, рассчитанных по суммам гармоник, и соответствующими рядами фактических значений для разных ледовых характеристик и пунктов Татарского пролива, Берингова и Охотского морей варьируют от 0,5 до 0,8. Эти значения близки к данным для европейских морей, что свидетельствует о возможности применения единых гармоник для европейских и азиатских морей.

В табл. 5 и 6 приведены результаты расчетов ледовых характеристик по зависимому ряду и независимому 7-летнему ряду (с ледового сезона 2009/2010 гг. по сезон 2015/2016 гг.) для дальневосточных морей.

Таблица 5. Результаты расчета ледовых характеристик по зависимому (З) и независимому (Н) рядам для Берингова моря

Характеристика	Пункт, район моря	ОБ метода, %	ОБ климатическая, %	ЭФ (З), %	ЭФ (Н), %
СГДМ	Э	88	67	21	71
	АН	79	67	12	71
	ПК	89	66	23	57
ПП	Э	94	75	19	14
	АН	91	76	15	29
	ПМ	83	69	14	14
ОО	Э	97	68	29	71
	А	98	70	28	57
	ПМ	90	73	17	14
ЛП	Э	93	69	24	57
	АН	93	77	16	71
	ПМ	89	74	15	0
МТ	Э	93	66	27	57
	АН	91	65	26	29
МЛ	БМ	98	70	28	0
Среднее		91	70	21	40

Примечание. ОБ – обеспеченность, ЭФ - эффективность; Э – Эгвекинот, АН – Анадырь, ПК – Петропавловск Камчатский, ПМ – Петропавловский маяк, БМ – Берингово море.

123

Таблица 6. Результаты расчета ледовых характеристик по зависимому (З) и независимому (Н) рядам для Охотского моря и Татарского пролива

Характеристика	Пункт, район моря	ОБ метода, %	ОБ климатическая, %	ЭФ (З), %	ЭФ (Н), %
СГДМ	М	91	68	23	57
	О	86	69	17	71
	СГ	89	68	21	29
ПП	М	92	66	26	29
	О	92	79	13	0
	СГ	90	66	24	0
ОО	М	91	72	19	71
	О	89	58	31	71
	СГ	93	69	24	0
ЛП	М	94	72	22	43
	О	87	60	27	43
	СГ	91	65	26	0
МТ	АЯ	91	73	18	29
	СГ	92	75	17	0
МЛ	ОМ	97	66	31	43
	ТП	97	62	35	14
Среднее		91	68	23	31

Примечание. ОБ – обеспеченность, ЭФ - эффективность; М – Магадан, О – Охотск, АЯ – Аян, СГ – Советская гавань; ОМ – Охотское море, ТП – Татарский пролив.

Расчеты ледовых характеристик по зависимому и независимому рядам дали удовлетворительные результаты. Средняя эффективность метода по зависимому ряду по всем элементам ледового режима и пунктам составила 22 %, по независимому 7-летнему ряду – 35 %. На рис. 1 и 2 для примера представлены результаты расчета некоторых ледовых характеристик.

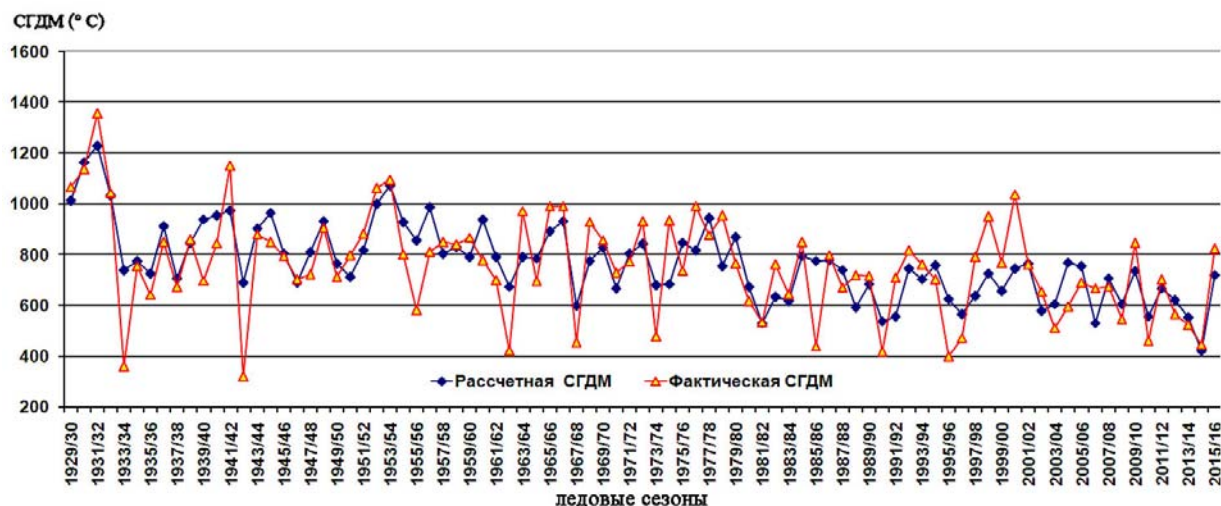


Рис. 1. Расчет СГДМ в Петропавловске-Камчатском по зависимому (1930–2009 гг.) и независимому (2010–2016 гг.) рядам.

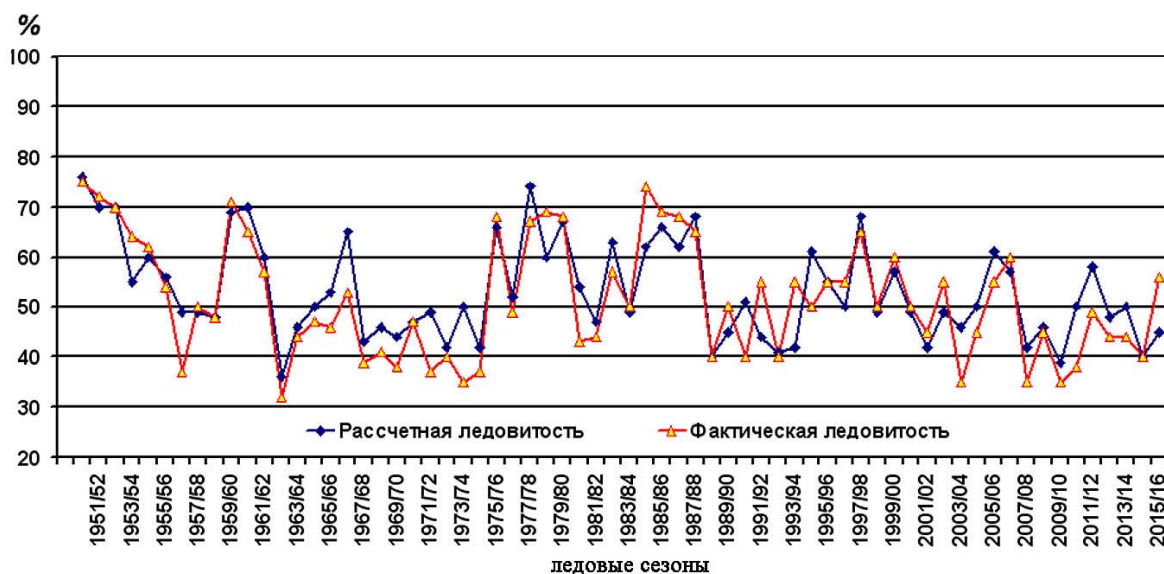


Рис. 2. Расчет максимальной за ледовый сезон ледовитости Татарского пролива по зависимому (1951–2009 гг.) и независимому (2010–2016 гг.) рядам.

Заключение

1. Расчет ледовых характеристик дальневосточных морей ансамблевым методом по зависимому и независимому рядам дали удовлетворительный результат.

2. Средняя для всех пунктов эффективность метода по зависимым рядам составляет для элементов ледового режима восточных морей:

- СГДМ – 20 % при обеспеченности 87 %;
- ПП – 19 % при обеспеченности 90 %;
- ОО – 25 % при обеспеченности 93 %;
- ЛП – 21 % при обеспеченности 91 %;
- МЛ – 31 % при обеспеченности 97 %;
- МТ – 23 % при обеспеченности 93 %.

3. Эффективность прогноза для восточных морей по независимому 7-летнему ряду составляет в среднем 35 %.

Поскольку единый принцип прогнозирования в настоящее время применяется для всех российских неарктических морей, было проведено аналогичное комплексное испытание методики для всех европейских и азиатских морей (Баренцево и Белое моря, Финский залив, Азовское море, Северный Каспий, Берингово и Охотское море, Татарский пролив).

Средняя эффективность расчетов по ряду до сезона 2009/2010 гг. включительно составила для всех этих морей 23 %. Средняя эффективность прогнозов по 7-летнему ряду составила 33 %.

Анализ базы предикторов, приведенных в [14], показал, что:

– наибольшее влияние на ледовые условия дальневосточных морей в предстоящую зиму оказывает состояние поля приземной температуры в мае – июле, поля приземного давления – в июле-августе;

– подтвердилось ожидаемое большое влияние на ледовые условия дальневосточных морей в предстоящую зиму летнего давления в районе Сибирского максимума, которое, однако, не превысило суммарного влияния Азорского максимума и Исландского минимума, что свидетельствует о действии дальних связей, а также о единстве термобарических процессов в планетарном масштабе;

– влияние давления в районе Алеутского минимума оказалось наименее существенным по сравнению с районами других центров действия атмосферы, зато очень высоким оказалось влияние температуры воздуха в этом районе.

Список литературы

1. Абузьяров З.К., Думанская И.О., Нестеров Е.С. Оперативное океанографическое обслуживание. – Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009. – 286 с.

2. Абузьяров З.К., Кудрявая К.И., Серяков Е.И., Скриптунова Л.И. Морские прогнозы. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 320 с.

3. *Гудкович З.М., Кириллов А.А., Ковалев Е.Г. и др.* Основы методики долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 348 с.
4. *Думанская И.О.* Зависимость ледовитости Белого моря от макроциркуляционных атмосферных процессов // Труды Гидрометцентра России. – 2004. – Вып. 339. – С. 55–63.
5. *Думанская И.О.* Методика долгосрочного прогноза ледовых условий на европейских морях России // – Метеоспектр. – 2009. – № 4. – С. 88–96.
6. *Думанская И.О.* Оценка возможности использования вероятностных характеристик дрейфующего льда и численной модели перераспределения льда в Белом море для гидрометеорологического обеспечения морских транспортных операций в условиях климатических изменений // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2007. – № 77. – С. 128–142.
7. *Думанская И.О., Котилевская А.М.* Оценка возможности использования в современной практике ледового обслуживания мореплавания прогностических методик XX века на неарктических морях России // Труды Гидрометцентра России. – 2009. – Вып. 343. – С. 67–88.
8. *Думанская И.О.* Анализ влияния центров действия атмосферы на характер зим на морях европейской части России // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 345. – С. 56–82.
9. *Думанская И.О.* Метод долгосрочного прогноза ледовых условий на Белом и Азовском морях // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 345. – С. 83–104.
10. *Думанская И.О.* О методике долгосрочного прогноза ледовых условий на европейских морях России // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 11 – С. 64–76.
11. *Думанская И.О.* Метод долгосрочного прогноза ледовых условий на Белом и Азовском морях, основанный на использовании статистического моделирования // Информационный сборник № 40 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2013. – С. 41–63.
12. *Думанская И.О.* Метод долгосрочного прогноза ледовых условий в Баренцевом море, Финском заливе и в северной части Каспийского моря, основанный на использовании статистического моделирования// Информационный сборник № 42. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2015. – С.111-128.
13. *Думанская И.О.* Ледовые условия морей европейской части России. М.: ИГ-СОЦИН, 2014. – 605 с.
14. *Думанская И.О.* Методика долгосрочного прогноза ледовых условий дальневосточных морей // Труды Гидрометцентра России. – 2016. – Вып. 362. – С. 109–128.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ МЕТОДА ОЦЕНКИ УСЛОВИЙ ВЕГЕТАЦИИ И ПРОГНОЗА УРОЖАЙНОСТИ КУКУРУЗЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВОЙ И НАЗЕМНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПО СУБЪЕКТАМ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

В ФГБУ «ВНИИСХМ» в 2011–2013 гг. на основе прикладной динамико-статистической модели формирования урожая «погода – урожай» [7–10] впервые был разработан метод оценки условий вегетации и прогноза урожайности кукурузы с использованием спутниковой и наземной информации по 16 субъектам южной половины ЕТР (основные субъекты возделывания кукурузы) (автор метода – Т.А. Найдина).

Метод разработан в соответствии с требованиями:

- единый методический подход к составлению оценок и прогнозов по всей территории и по всем культурам;
- использование универсального объема исходной оперативной информации, обеспеченной системой наблюдений Росгидромета;
- использование рядов урожайности с уборочной площади в доработанном весе (данные РОССТАТа России);
- единые сроки составления оценок и прогнозов по территории Российской Федерации;
- реализация методов по всем субъектам Российской Федерации.

Динамико-статистический метод прогноза урожайности кукурузы основан на сочетании двух прогнозов: прогноза тенденции урожайности с помощью метода гармонических весов [9] и оценки отклонений урожайности от тенденции, выполняемых с помощью усовершенствованной модели продукционного процесса кукурузы с использованием спутниковой информации [3–6, 13].

Разработаны два динамико-статистических метода прогноза урожайности зерна кукурузы:

- с использованием оперативной метеорологической информации;
- с включением оперативных спутниковых данных (индекс NDVI) наряду с метеорологической и агрометеорологической информацией.

Индекс NDVI является комплексным показателем текущего состояния посевов. В оперативном режиме средние областные декадные значения вегетационного индекса NDVI помещаются на специализированном сайте Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН).

Прогноз ожидаемой урожайности кукурузы по субъектам Российской Федерации составляется на 21 июня и уточняется 21 июля.

Испытания автоматизированной технологии составления оценки условий вегетации и прогноза урожайности кукурузы на зерно в ФГБУ «Гидрометцентр России»

В ФГБУ «Гидрометцентр России» в рамках ранее созданной информационно-прогностической системы (ИПС) в 2013 г. была установлена автоматизированная подсистема оценки условий вегетации и прогноза урожайности кукурузы по субъектам Российской Федерации. Производственные испытания двух методов прогноза урожайности кукурузы проводились в течение трех лет, с 2014 по 2016 год.

В рамках ИПС ежедекадно осуществляется обработка агрометеорологических телеграмм, поступающих с сети гидрометеорологических станций, и в установленные «Планом выпуска основных агрометеорологических прогнозов и докладов на 2016–2020 годы» сроки проводятся расчеты ожидаемой урожайности сельскохозяйственных культур одновременно по всем субъектам Российской Федерации [1, 7, 11]. Основное меню ИПС и подменю для расчета ожидаемой урожайности кукурузы показаны на рис. 1.

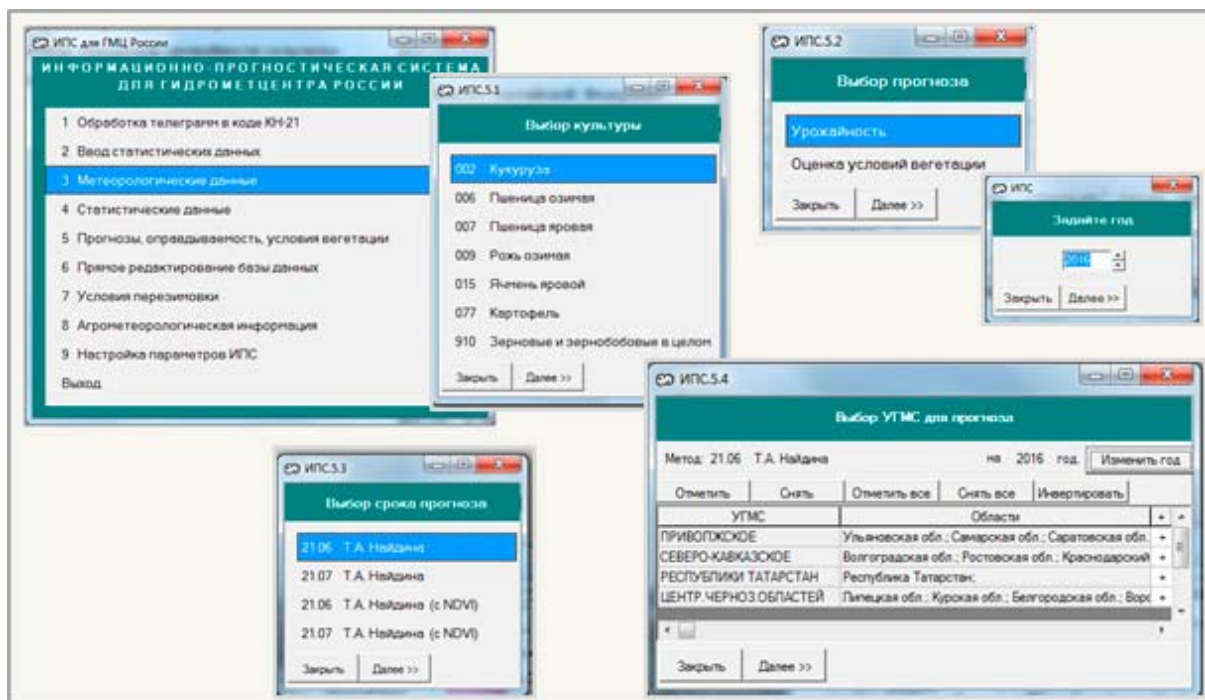


Рис. 1. Раздел ИПС «Прогнозы, оправдываемость, условия».

На рис. 2 приведены примеры выходных файлов в ИПС с расчетами прогнозируемой урожайности кукурузы и оправдываемости прогнозов по субъектам.

Прогноз урожайности в расчете с уборочной площади на 21.06.2016					
Культура - Кукуруза					
Автор(ы) метода: Т.А. Найдина					
УТМС, субъект РФ	Тенденция урожайности, ц/га	Оценка условий вегетации, %	Прогноз урожайности, ц/га	Уборочная площадь, тыс. га	Валовой сбор, тыс. тонн
ПРИВОЛЖСКОЕ					
Ульяновская обл.	31,0	84,0	26,0	9,1	23,70
Самарская обл.	30,0	105,5	31,6	35,5	112,32
Саратовская обл.	38,8	114,5	44,4	65,6	291,40
Оренбургская обл.	19,5	99,2	19,4	32,6	63,18
СЕВЕРО-КАВКАЗСКОЕ					
Волгоградская обл.	27,0	105,8	28,6	61,6	175,91
Ростовская обл.	27,0	99,8	26,9	216,6	583,67
Краснодарский кр.	55,0	97,1	53,4		
Кабар.-Балкарская Респуб.	57,4	131,6	73,6		
Ставропольский кр.	46,0	125,0	57,5		
Республика Сев. Осетия - Алания	63,9	119,5	76,4		
Респуб. Дагестан	30,0	116,4	34,9		
РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН					
Республика Татарстан	40,0	114,4	45,7		
ЦЕНТР ЧЕРНОЗ. ОБЛАСТЕЙ					
Липецкая обл.	62,4	110,9	69,2		
Курская обл.	66,5	107,9	71,8		
Белгородская обл.	61,5	106,7	65,7		
Воронежская обл.	46,1	99,5	45,9		

Оправдываемость метода прогноза урожайности на 21.06.2016				
Культура - Кукуруза				
Автор(ы) метода: Т.А. Найдина				
Субъект Российской Федерации	Прогноз урожайности, ц/га	Фактическая урожайность, ц/га	Относительная ошибка, %	Оправдываемость прогноза, %
Липецкая обл.	69,2	58,5	13,3	81,7
Курская обл.	71,8	76,9	6,6	93,4
Белгородская обл.	65,7	72,3	9,1	90,9
Воронежская обл.	45,9	48,8	5,9	94,1
Республика Татарстан	45,7	33,2	37,7	62,3
Ульяновская обл.	26,0	30,4	14,5	85,5
Самарская обл.	31,6	33,7	6,2	93,8
Саратовская обл.	44,4	37,8	17,5	82,5
Оренбургская обл.	19,4	17,3	12,1	87,9
Волгоградская обл.	28,6	39,1	26,9	73,1
Ростовская обл.	26,9	37,3	27,9	72,1
Краснодарский кр.	53,4	55,3	3,4	96,6
Кабар.-Балкарская Респуб.	75,6	71,8	5,3	94,7
Ставропольский кр.	57,5	64,1	10,3	89,7
Республика Сев. Осетия - Алания	76,4	57,0	34,0	66,0
Респуб. Дагестан	34,9	32,7	6,7	93,3

Рис. 2. Пример результатов расчета прогноза урожайности кукурузы и его оправдываемости в ИПС»

Согласно Методическим указаниям [12], оценка успешности агрометеорологических прогнозов проводилась на материалах независимой выборки с помощью двух критериев: оправдываемости метода и его ошибки за период авторских и производственных наблюдений.

В табл. 1 и 2 приведены результаты авторских (2011–2013 гг.) и производственных (2014–2016 гг.) испытаний двух динамико-статистических методов прогноза урожайности кукурузы (с использованием только наземной и с использованием наземной и спутниковой информации) для двух сроков прогноза (21 июня, 21 июля) за период 2011–2016 гг. Для сравнения здесь же приведены результаты оправдываемости прогнозов урожайности кукурузы, рассчитанные с помощью инерционного и климатологического методов прогноза.

В первый срок прогноза (21 июня) испытываемый метод в ряде субъектов Приволжского и Южного федеральных округов (Ульяновская, Самарская, Саратовская, Волгоградская и Ростовская области, Республика Дагестан, Северная Осетия) в одном или в обоих методах имели оправдываемость или среднюю ошибку оправдавшихся прогнозов несколько ниже, чем соответствующие показатели инерционного и климатологического методов прогноза (табл. 1).

Таблица 1. Результаты авторских и производственных испытаний динамико-статистических методов прогноза урожайности кукурузы на 21 июня (первый срок прогноза) за период 2011–2016 гг.

№ п/п	Субъект федерации	Метод прогноза					
		динамико-статистический		инерционный		климатический	
		Оправды- ваемость, %	Отн. ошибка оправдыв. прогнозов, %	Оправды- ваемость, %	Отн. ошибка оправдыв. прогнозов, %	Оправды- ваемость, %	Отн. ошибка оправдыв. прогнозов, %
С использования наземной информации							
1	Липецкая обл.	83,3	15,4	50,0	5,0	50,0	21,6
2	Курская обл.	100,0	13,3	66,7	12,5	50,0	11,1
3	Белгородская обл.	83,3	11,3	83,3	14,1	16,7	13,1
4	Воронежская обл.	83,3	5,4	50,0	2,3	33,3	8,5
5	Республика Татарстан	83,3	21,7	66,7	27,9	66,7	35,2
6	Ульяновская обл.	83,3	12,6	66,7	13,6	83,3	8,0
7	Самарская обл.	83,3	20,8	83,3	11,5	50,0	7,0
8	Саратовская обл.	83,3	19,8	83,3	18,1	83,3	16,5
9	Оренбургская обл.	100,0	17,4	83,3	13,0	100,0	26,7
10	Волгоградская об.	66,7	18,9	50,0	11,0	83,3	9,6
11	Ростовская обл.	83,3	9,2	50,0	11,9	83,3	18,9
12	Краснодарский край	100,0	7,5	63,7	4,7	50,0	10,8
13	Кабардино-Балкарская Республика	50,0	8,1	50,0	7,6	33,3	5,0
14	Ставропольский край	66,7	9,8	50,0	4,9	66,7	9,3
15	Республика Северная Осетия	33,3	4,7	83,3	5,9	100,0	5,8
16	Республика Дагестан	83,3	4,8	66,7	5,4	83,3	5,7
С использованием наземной и спутниковой информации							
1	Липецкая обл.	83,3	13,3	50,0	5,1	50,0	21,5
2	Курская обл.	100,0	11,7	66,7	12,5	50,0	11,1
3	Белгородская обл.	100,0	10,9	83,3	14,3	16,7	13,1
4	Воронежская обл.	83,3	2,9	50,0	2,3	33,3	8,5
5	Республика Татарстан	83,3	25,1	66,7	27,9	66,7	35,2
6	Ульяновская обл.	83,3	11,9	66,7	13,6	83,3	8,0
7	Самарская обл.	83,3	19,1	83,3	11,5	50,0	7,0
8	Саратовская обл.	66,7	20,8	83,3	18,1	83,3	16,5
9	Оренбургская обл.	100,0	16,7	83,3	13,0	100,0	26,7
10	Волгоградская об.	83,3	11,7	50,0	11,0	83,3	9,6
11	Ростовская обл.	50,0	9,6	50,0	11,9	83,3	18,9
12	Краснодарский край	83,3	8,6	66,7	4,7	50,0	10,8
13	Кабардино-Балкарская Республика	50,0	5,5	50,0	7,6	33,3	5,0
14	Ставропольский край	66,7	8,8	50,0	4,9	66,7	9,3
15	Республика Северная Осетия	66,7	4,0	83,3	5,9	100,0	5,8
16	Республика Дагестан	83,3	7,4	66,7	5,4	83,3	5,7

Во второй срок прогноза (21 июля), в целом, результаты испытаний методов прогноза урожайности кукурузы выше, чем в первый срок (табл. 2): параметры оценки качества прогнозов испытываемого метода ниже, чем инерционного и климатологического методов,

только в Самарской области, Республике Дагестан и Северной Осетии – для метода с использованием наземной информации; только в Северной Осетии – для метода с использованием наземной и спутниковой информации одновременно.

Таблица 2. Результаты авторских и производственных испытаний динамико-статистических методов прогноза урожайности кукурузы на 21 июля (второй срок прогноза) за период 2011–2016 гг.

№ п/п	Субъект федерации	Метод прогноза					
		динамико-статистический		инерционный		климатический	
		Оправды- ваемость, %	Отн. ошибка оправд. про- гнозов, %	Оправды- ваемость, %	Отн. ошибка оправд. про- гнозов, %	Оправды- ваемость, %	Отн. ошибка оправд. про- гнозов, %
С использования наземной информации							
1	Липецкая обл.	83,3	11,1	50,0	5,0	16,7	6,5
2	Курская обл.	100,0	3,5	66,7	12,5	50,0	11,1
3	Белгородская обл.	83,3	9,0	50,0	13,0	16,7	13,1
4	Воронежская обл.	83,3	5,4	50,0	2,3	33,3	8,5
5	Республика Татарстан	83,3	15,7	50,0	19,4	66,7	35,2
6	Ульяновская обл.	100,0	14,6	66,7	13,6	83,3	8,0
7	Самарская обл.	66,7	11,2	83,3	11,5	50,0	6,0
8	Саратовская обл.	66,7	7,6	50,0	15,9	66,7	11,9
9	Оренбургская обл.	100,0	10,2	83,3	13,0	83,3	22,9
10	Волгоградская об.	66,7	5,4	33,3	6,4	66,7	6,4
11	Ростовская обл.	83,3	4,7	33,3	4,1	66,7	14,8
12	Краснодарский край	100,0	4,0	66,7	4,7	50,0	10,8
13	Кабардино-Балкарская Республика	100,0	6,8	50,0	7,6	33,3	5,0
14	Ставропольский край	83,3	9,9	50,0	4,9	66,7	9,3
15	Республика Северная Осетия	50,0	4,3	66,7	4,2	83,3	4,4
16	Республика Дагестан	100,0	3,5	66,7	12,5	50,0	11,1
С использованием наземной и спутниковой информации							
1	Липецкая обл.	83,3	3,2	50,0	5,1	16,7	6,5
2	Курская обл.	83,3	2,1	66,7	12,5	50,0	11,1
3	Белгородская обл.	83,3	10,4	50,0	13,0	16,7	13,1
4	Воронежская обл.	66,7	10,5	50,0	2,3	33,3	8,5
5	Республика Татарстан	83,3	2,0	50,0	19,4	66,7	35,2
6	Ульяновская обл.	100,0	13,6	66,7	13,6	83,3	8,0
7	Самарская обл.	83,3	8,1	83,3	11,5	50,0	7,0
8	Саратовская обл.	66,7	6,1	50,0	15,9	66,7	11,9
9	Оренбургская обл.	100,0	11,6	83,3	13,0	83,3	22,9
10	Волгоградская об.	66,7	4,9	33,3	4,9	66,7	6,4
11	Ростовская обл.	83,3	6,3	33,3	4,1	66,7	14,8
12	Краснодарский край	83,3	6,5	66,7	4,7	50,0	10,8
13	Кабардино-Балкарская Республика	83,3	2,9	50,0	7,6	33,3	5,0
14	Ставропольский край	83,3	6,1	50,0	4,9	66,7	9,3
15	Республика Северная Осетия	50,0	2,9	66,7	4,2	83,3	4,4
16	Республика Дагестан	66,7	4,1	50,0	4,5	50,0	3,1

В целом по территории кукурузосеющих субъектов испытываемый метод без использования NDVI в первый срок имеет оправдываемость по территории 79,2 %, а во второй – 81,2 %. Метод прогноза с использованием, наряду с оперативной метеорологической информацией, индексов NDVI в оба срока прогноза имеет оправдываемость по территории – 79,2 %. При этом оправдываемость инерционного и климатологического методов не превышают 65 %, а климатологического – 56 %. Такие показатели качества прогнозов позволяют использовать испытываемый метод прогноза в оперативной работе.

В период производственных испытаний (2014–2016 гг.) на независимом материале в ФГБУ «Гидрометцентр России» было составлено по 96 прогнозов урожайности кукурузы по субъектам Российской Федерации с использованием только наземной и с использованием одновременно наземной и спутниковой информации. В табл. 3 приведена оправдываемость прогнозов по относительной ошибке согласно Инструкции [2]. Качество прогнозов оценивается по балльной шкале: оправдываемость 91 % и более – 5 баллов, 90–81 % – 4 балла; 80–70 % – 3 балла; менее 70 % – 0 баллов.

Таблица 3. Оправдываемость прогнозов урожайности кукурузы по субъектам Российской Федерации в период производственных испытаний в Гидрометцентре России в 2011–2016 гг.

№ п/п	Субъект федерации	Метод прогноза					
		2014		2015		2016	
		21 июня	21 июля	21 июня	21 июля	21 июня	21 июля
С использования наземной информации							
1	Липецкая обл.	33,9	56,5	86,1	91,3	81,7	81,5
2	Курская обл.	88,8	98,4	80,8	95,6	93,4	94,4
3	Белгородская обл.	85,4	79,4	100	88,6	90,9	95,0
4	Воронежская обл.	57,9	46,0	96,1	94,8	92,4	98,4
5	Республика Татарстан	67,9	84,3	61,9	48,1	62,3	73,8
6	Ульяновская обл.	90,2	66,5	86,6	87,0	85,5	77,3
7	Самарская обл.	82,1	69,2	83,4	53,4	93,8	85,2
8	Саратовская обл.	32,0	42,1	80,3	74,0	82,5	86,5
9	Оренбургская обл.	81,5	97,7	92,9	73,2	87,9	93,6
10	Волгоградская об.	77,4	75,3	79,2	99,4	73,1	49,1
11	Ростовская обл.	95,9	95,6	93,6	97,2	72,1	63,5
12	Краснодарский край	99,6	96,8	92,0	96,7	96,6	97,8
13	Кабардино-Балкарская Республика	83,5	93,6	75,7	92,4	94,7	92,6
14	Ставропольский край	79,5	85,7	61,8	74,8	89,7	89,7
15	Республика Северная Осетия	78,7	85,4	47,3	65,2	66,0	65,6
16	Республика Дагестан	98,8	79,7	85,1	80,4	93,9	95,1
Оправдываемость по территории		75	69	81	81	88	81

С использованием наземной и спутниковой информации							
1	Липецкая обл.	32,6	56,5	81,4	95,8	81,9	99,5
2	Курская обл.	80,8	97,7	81,3	99,5	90,0	78,6
3	Белгородская обл.	86,0	90,0	97,6	87,8	96,1	82,4
4	Воронежская обл.	62,1	65,1	99,0	88,5	98,4	81,4
5	Республика Татарстан	73,4	99,7	57,8	46,5	59,3	92,5
6	Ульяновская обл.	94,9	66,9	77,9	89,5	92,8	80,6
7	Самарская обл.	90,3	72,4	97,1	95,2	75,2	91,4
8	Саратовская обл.	36,4	52,2	75,9	74,0	77,6	89,4
9	Оренбургская обл.	83,3	89,8	99,6	76,3	80,9	91,3
10	Волгоградская об.	96,9	86,8	82,1	65,5	89,7	62,7
11	Ростовская обл.	71,5	93,3	68,2	84,1	74,5	75,0
12	Краснодарский край	88,1	89,0	83,3	85,4	97,3	90,3
13	Кабардино-Балкарская Республика	82,5	95,2	80,4	89,4	95,5	97,2
14	Ставропольский край	82,0	95,3	68,3	85,1	90,7	81,2
15	Республика Северная Осетия	100,0	89,4	71,4	84,7	67,0	76,4
16	Республика Дагестан	90,4	80,0	96,1	71,7	93,3	93,3
Оправдываемость по территории		81	75	81	88	88	94

Оправдываемость прогнозов урожайности кукурузы в период производственных испытаний по относительной ошибке для двух сроков прогноза с использованием только наземной информации имеет, в целом, высокую оправдываемость по территории – от 75 до 88 %. И только в одном случае (2014 г., 2 срок прогноза) оправдываемость прогнозов в целом по территории была немного ниже 70 %, а именно – 69 %.

Оправдываемость прогнозов, получаемых с использованием наземной и спутниковой информации, за период с 2014 по 2016 г. оказалась более высокой, чем у метода прогноза, основанного на использовании только метеорологической информации – 75–94 %.

Рекомендации о внедрении

Решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от 4 июля 2017 года автоматизированная технология составления оценок условий вегетации и прогнозов урожайности кукурузы с использованием спутниковой и наземной информации по 16 субъектам Российской Федерации рекомендована для использования в ФГБУ «Гидрометцентр России» в качестве основного расчетного метода.

Одновременно с испытаниями в Гидрометцентре России, в 2013–2016 гг. методы прогноза урожайности кукурузы проходили испытания в Северо-Кавказском УГМС для семи

кукурузосеющих субъектов Российской Федерации, относящихся к Южному и Северо-Кавказскому федеральным округам.

По решению Технического совета Северо-Кавказского УГМС от 16 февраля 2017 года методы внедрены в оперативную практику:

– в первый срок составления прогноза (20 июня) в качестве основного по территориям Краснодарского края (с включением вегетационного индекса и без него); Волгоградской области, Ставропольского края и Республики Дагестан (с включением вегетационного индекса), а также по Ростовской области (без включения вегетационного индекса);

– во второй срок составления прогноза (20 июля) в качестве основного по территориям Волгоградской и Ростовской областей и Кабардино-Балкарской Республики (с включением вегетационного индекса и без него); Краснодарскому и Ставропольскому краям, Республике Дагестан (без включения вегетационного индекса).

Список литературы

1. Гончарова Т.А., Найдина Т.А., Лебедева В.М., Богомолова Н.А. Результаты авторских и производственных испытаний в ФГБУ «Гидрометцентр России» автоматизированной технологии составления оценки условий вегетации и прогноза урожайности яровой пшеницы и картофеля по субъектам Российской Федерации // Информационный сборник № 41 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – М; Обнинск: ИГ СОЦИН, 2014. – С. 111–126.

2. Инструкция по оценке оправдываемости агрометеорологических прогнозов. – М.: Гидрометеиздат, 1983. – 7 с.

3. Клещенко А.Д., Найдина Т.А. Динамическая модель продукционного процесса кукурузы с использованием спутниковой информации и методы прогноза урожайности // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 12. – С. 88–98.

4. Клещенко А.Д., Найдина Т.А., Гончарова Т.А. Использование данных дистанционного зондирования для моделирования продукционного процесса кукурузы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9, № 3. – С. 259–268.

5. Клещенко А.Д., Лебедева В.М., Найдина Т.А., Савицкая О.В. Использование спутниковой информации MODIS в оперативной агрометеорологии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12, № 2. – С. 143–154.

6. Клещенко А.Д., Лебедева В.М., Найдина Т.А., Гончарова Т.А., Шкляева Н.М. Оперативное информационно-прогностическое обеспечение потребителей агрометеорологической продукции // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – 2015. – Вып. 179. – С. 33–43.

7. *Лебедева В.М., Страшная А.И.* Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том II. Методы расчетов и прогнозов в агрометеорологии. Книга 2. Оперативное агрометеорологическое прогнозирование: Учебное пособие – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. – 216 с.

8. *Полевой А.Н.* Теория и расчет продуктивности сельскохозяйственных культур. Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 175 с.

9. *Полевой А.Н.* Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 320 с.

10. *Полевой А.Н., Русакова Т.И. и др.* Прикладная динамическая модель формирования урожая сельскохозяйственных культур // Гидрометеорологическое обеспечение агропромышленного комплекса страны: Сб. докладов. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – С. 15–31.

11. *Русакова Т.И.* Автоматизированная система оценки агрометеорологических условий вегетации и прогноза урожайности озимой ржи и пшеницы по территории субъектов Российской Федерации // Информационный сборник № 32 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2006. – С. 58–64.

12. РД 52.27.284-91 Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. – М.: Госкомгидромет. 1991. – С. 98–107.

13. *Kleshchenko A.D.; Naidina T.A.; Goncharova T.A.; Lebedeva V.M.* Evaluation of growth conditions and maize yield forecast in Russian regions from satellite data in a simulation model // Italian Journal of Agrometeorology-Rivista Italiana di Agrometeorologia. – 2016. – Vol: 21, no. 1 – P. 59–66.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ МЕТОДА ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА УРОЖАЙНОСТИ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ ПО ФЕДЕРАЛЬНЫМ ОКРУГАМ И РОССИИ В ЦЕЛОМ

В ФГБУ «ВНИИСХМ» в 2011–2013 гг. впервые был разработан метод долгосрочного прогноза урожайности яровой пшеницы по федеральным округам и России в целом, заблаговременность прогноза составляет 5 месяцев (автор – В.М. Лебедева). Метод прогноза урожайности яровой пшеницы разработан на основе синоптико-статистического подхода, основанного на сочетании двух прогнозов: прогноза трендовой составляющей урожайности и оценки отклонений урожайности от тренда, выполняемой с помощью синоптико-статистического метода оценки агрометеорологических условий формирования урожая [2–6, 8–10].

В соответствии с рабочей гипотезой выявлены устойчивые временные связи между характеристиками циркуляции атмосферы и теплового состояния поверхности океанов в предшествующий периоду вегетации осенне-зимний период и урожайностью яровой пшеницы по федеральным округам. Блок-схема долгосрочного прогноза урожайности яровой пшеницы по федеральным округам приведена на рис. 1.

Для расчета ожидаемой урожайности яровой пшеницы используются следующие статистические и метеорологические исходные данные:

1. Статистические данные по федеральным округам: фактическая урожайность яровой пшеницы с 1981 г. по год, предшествующий году прогноза.

2. Метеорологические данные:

– средние месячные значения геопотенциала на уровне 500 гПа за осенне-зимний период (с октября по февраль) с 1981 г. по год прогноза;

– средние месячные значения температуры поверхности Тихого и Атлантического океанов за осенне-зимний период (с октября по февраль) с 1981 г. по год прогноза;

– средние месячные значения индексов Североатлантического колебания с 1981 по год прогноза;

– средние месячные значения центров действия атмосферы (широта и долгота Азорского и Сибирского максимумов) с 1981 по год прогноза.



Рис. 1. Блок-схема долгосрочного прогноза урожайности яровой пшеницы по федеральным округам.

В табл. 1 приведены отобранные потенциальные предикторы, используемые в уравнениях для расчета прогноза урожайности яровой пшеницы по федеральным округам Российской Федерации. В качестве математического аппарата для расчета прогностических отклонений урожайности от тренда применяется метод разложения случайных полей по естественным ортогональным составляющим [7]. На рис. 2, для примера, на картосхемах показаны области, значения температуры поверхности воды Тихого океана и геопотенциала на уровне 500 гПа в которых используются для построения прогностических уравнений для прогноза урожайности яровой пшеницы по Приволжскому федеральному округу.

Для составления долгосрочных прогнозов ожидаемой урожайности яровой пшеницы разработан пользовательский интерфейс, позволяющий в значительной мере упростить работу агрометеоролога-прогнозиста [6]. На основании полученных прогностических значений урожайности ярой пшеницы по округам рассчитываются прогностические значения валового сбора яровой пшеницы по округам и России в целом, при этом используются данные о посевных площадях культуры за предшествующий прогнозу год.

Результаты испытаний метода прогноза

Производственные испытания метода прогноза урожайности яровой пшеницы по федеральным округам Российской Федерации проводились в ФГБУ «Гидрометцентр России» (отв. – О.В. Береза) в течение трех лет (2014–2016 гг.).

Согласно Методическим указаниям [10] оценка успешности агрометеорологических прогнозов проводилась на материалах независимой выборки с помощью двух критериев: оправдываемости метода и его ошибки. Испытываемый метод рекомендуется к внедрению в оперативную работу, если не менее 70 % субъектов территории имеют показатели «оправдываемость» и «ошибка» метода лучше аналогичных показателей инерционного и климатологического прогнозов.

Выводы о приемлемости метода для оперативной работы делаются на основании испытаний в течение 5–7 лет, из них авторские испытания в течение 3–5 лет и производственные испытания в течение двух-трех лет.

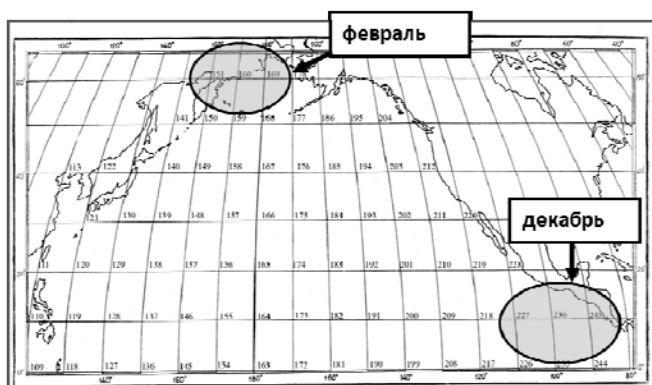
За девятилетний период (2008–2016 гг.) во всех восьми федеральных округах оправдываемость испытываемого метода выше оправдываемости инерционного и климатологического методов прогноза. Таким образом, 100 % субъектов территории имеют показатели «оправдываемость» и «ошибка» метода выше аналогичных показателей инерционного и климатологического прогнозов (табл. 2).

Таблица 1. Предикторы, используемые в уравнениях для расчета прогноза урожайности яровой пшеницы по федеральным округам Российской Федерации

Федеральный округ	Предикторы																	
	Центры действия атмосферы		Индексы САК	Средняя месячная температура поверхности воды Атлантического океана					Средняя месячная температура поверхности воды Тихого океана					Средние месячные значения геопотенциала на уровне 500 гПа				
				Месяц, предшествующий периоду вегетации (октябрь-февраль)														
	Сибирский	Азорский		II	I	XII	XI	X	II	I	XII	XI	X	II	I	XII	XI	X
Центральный	+					+			+		+				+			
Северо-Западный									+	+					+		+	
Южный			+		+					+				+				
Северо-Кавказский	+	+								+					+			
Приволжский						+			+							+	+	
Уральский									+		+					+	+	
Сибирский						+				+					+			
Дальневосточный													+	+	+		+	

Примечание. Знаком «+» отмечены месяцы осенне-зимнего периода, за которые информация используется в уравнениях.

Средние месячные значения температуры поверхности воды Тихого океана



Средние месячные значения геопотенциала на уровне 500 гПа:

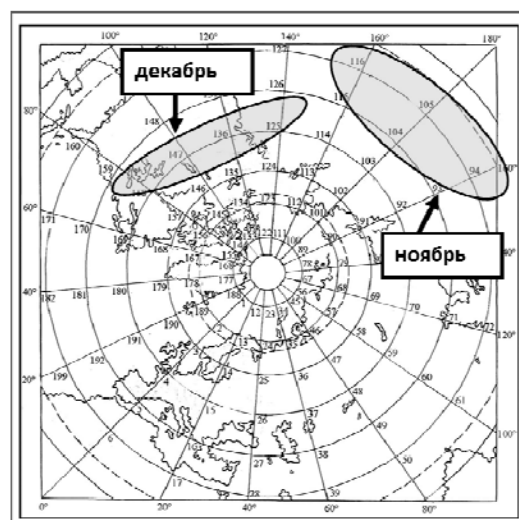


Рис. 2. Предикторы, отобранные для прогноза урожайности яровой пшеницы в Приволжском федеральном округе.

Таблица 2. Результаты авторских (2008–2013 гг.) и производственных (2014–2016 гг.) испытаний метода прогноза урожайности яровой пшеницы по федеральным округам

Федеральный округ	Метод прогноза урожайности					
	испытываемый		инерционный		климатологический	
	оправды- ваемость, %	ошибка, %	оправды- ваемость, %	ошибка, %	оправды- ваемость, %	ошибка, %
97 % посевной площади						
Сибирский	88,9	9,1	55,6	9,0	77,8	6,7
Приволжский	88,9	8,0	66,7	15,8	77,8	20,4
Уральский	88,9	11,8	77,8	11,1	77,8	14,3
Центральный	77,8	10,0	66,7	8,2	44,4	11,7
Остальная территория						
Южный	88,9	12,7	55,6	18,8	77,8	24,2
Дальневосточный	77,8	10,1	44,4	16,0	66,7	15,9
Северо-Западный	66,7	3,5	55,6	5,2	33,3	5,4
Северо-Кавказский	88,9	8,1	55,6	13,3	66,7	12,3

В период производственных испытаний (2014–2016 гг.) было составлено 24 прогноза. Качество прогнозов согласно Инструкции по оценке агрометеорологических прогнозов [1] оценивается по балльной шкале: оправдываемость 91 % и более – 5 баллов; 90–81 % – 4 балла; 80 – 70 % – 3 балла; менее 70 % – 0 баллов (табл. 3).

В 2014 году прогноз не оправдался только в Уральском федеральном округе (69,3 %), при этом оправдываемость в среднем по территории (по восьми федеральным округам) составила 88 %, в 2015 году – все прогнозы оправдались – 100 %, в 2016 году прогноз не оправдался в двух федеральных округах: Приволжском и Южном (1,6 % от всей посевной

площади), оправдываемость по территории составила 75 %. На основании прогноза урожайности яровой пшеницы по федеральным округам была рассчитана урожайность яровой пшеницы по России в целом (в расчетах использовались данные о посевных площадях за предшествующий год). Средняя за три года относительная ошибка прогноза валового сбора яровой пшеницы в целом по Российской Федерации составила 11 %.

Таблица 3. Результаты производственных испытаний метода долгосрочного прогноза урожайности яровой пшеницы по федеральным округам и России в целом

Федеральный округ, Российская Федерация	Оправдываемость прогнозов (%) и оценка в баллах				Посевная площадь, %
	2014 г.	2015 г.	2016 г.	Средняя,%	
Российская Федерация	88,0 (4)	96,6(5)	83,0(4)	89,2	100
97 % посевной площади					
Сибирский	76,4(3)	97,1(5)	88,9(4)	87,5	47,6
Приволжский	98,5(5)	87,2(4)	44,1(0)	76,6	28,8
Уральский	69,3(0)	77,8(3)	69,6(3)	72,2	16,2
Центральный	74,4(3)	91,4(5)	89,3(4)	85,0	4,5
Остальная территория					
Южный	99,2(5)	88,4(4)	49,4(0)	79,0	1,6
Дальневосточный	71,8(3)	85,3(4)	75,0(3)	77,4	0,9
Северо-Западный	70,8(3)	96,5(5)	88,4(4)	85,2	0,4
Северо-Кавказский	97,3(5)	80,2(4)	86,4(4)	88,0	0,04
Оправдываемость по территории, %	88	100	75		

Рекомендации о внедрении

Решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от 7 июля 2017 года метод долгосрочного прогноза урожайности яровой пшеницы по федеральным округам и России в целом рекомендован к использованию в ФГБУ «Гидрометцентр России» в качестве основного расчетного метода. ФГБУ «ВНИИСХМ» рекомендовано доработать метод прогноза урожайности яровой пшеницы по Уральскому, Приволжскому и Южному федеральным округам.

Список литературы

1. Инструкция по оценке оправдываемости агрометеорологических прогнозов. – М.: Гидрометеиздат, 1983. – 7 с.
2. Лебедева В.М. Прогноз урожайности яровой пшеницы до сева по территории Восточно-Сибирского экономического района // Труды «ВНИИСХМ». – 2000. – Вып. 32. – С. 150–159.

3. *Лебедева В.М.* Метод долгосрочного прогноза теплообеспеченности вегетационного периода // *Метеорология и гидрология.* – 2005. – № 9. – С. 93–99.

4. *Лебедева В.М.* Долгосрочный синоптико-статистический метод прогноза валового сбора зерновых культур по федеральным округам и России в целом // *Труды ВНИИСХМ.* – 2010. – Вып. 37. – С. 69–81.

5. *Лебедева В.М., Страшная А.И.* Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том II. Методы расчетов и прогнозов в агрометеорологии. Книга 2. Оперативное агрометеорологическое прогнозирование: Учебное пособие. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. – 216 с.

6. *Лебедева В.М., Чуб О.В.* Результаты испытания метода долгосрочного прогноза урожайности зерновых и зернобобовых культур по федеральным округам и России в целом в ФГБУ «Гидрометцентр России» // Информационный сборник № 41 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2014. – С. 136–150.

7. *Мещерская А.В., Руховец Л.В., Юдин М.И., Яковлева Н.И.* Естественные составляющие метеорологических полей. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 200 с.

8. *Пасов В.М.* Изменчивость урожаев и оценка ожидаемой продуктивности зерновых культур. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 107 с.

9. *Пасов В.М., Аксарина Е.А., Лебедева В.М.* Особенности циркуляции атмосферы в годы с различной урожайностью кукурузы в США // *Труды ВНИИСХМ.* – 1991. – Вып. 28. – С. 62–81.

10. РД 52.27.284-91 Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. – М.: Госкомгидромет, 1991. – С. 98–107.

11. *Русакова Т.И., Лебедева В.М., Грингоф И.Г., Шкляева Н.М.* Современная технология поэтапного прогнозирования урожайности и валового сбора зерновых культур // *Метеорология и гидрология.* – 2006. – № 7. – С. 101–108.

УДК 551.509.313+551.509.324.2+551.508.85

Оперативная технология наукастинга осадков на основе радарных данных и результаты верификации для теплого периода года (май-сентябрь 2017 года) / Муравьев А.В., Киктев Д.Б., Смирнов А.В. // Информационный сборник № 45 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2018 – С. 3-30.

Дается краткое описание развернутой в Гидрометцентре России системы наукастинга осадков, функционирующей в режиме реального времени на основе последовательностей радарных полей, поступающих из Центральной Аэрологической Обсерватории. Расчетной основой системы является статистическая схема STEPS (Short-Term Ensemble Prediction System), построенная как мультипликативная каскадная модель с использованием технологии оптического потока. Демонстрируются результаты точечной и пространственной верификации результатов испытаний системы в теплый период года. Основные выводы относительно качества системы наукастинга совпадают с выводами зарубежных служб, эксплуатирующих данную или сходную статистическую схему наукастинга: в теплое время года полезный прогноз полей осадков возможен на интервале одного-двух часов.

Ключевые слова: наукастинг осадков, радарные осадки, турбулентный мультипликативный каскад, мезомасштабная верификация.

Табл. 10. Ил. 7. Библ. 13.

УДК 551.509.313+551.509.58

Результаты испытаний метода краткосрочного (до 48 ч) прогноза значений давления, приведенного к уровню моря по стандартной атмосфере, в пунктах и по территории Дальневосточного региона России по данным модели WRF-ARW с горизонтальным разрешением 15 км / Вербицкая Е.М., Романский С.О. // Информационный сборник № 45 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2018 – С. 31-53.

Приведены результаты оперативно-производственных испытаний численных прогнозов давления, приведенного к уровню моря по стандартной атмосфере (QNH), в аэропортах Восточной Сибири и Дальнего Востока России. Расчеты QNH выполнялись по выходной продукции модели WRF-ARW с горизонтальным разрешением 15 км. Представлена методика проведения испытаний. Прогнозы QNH сравнивались с данными наблюдений, поступающих в кодовой форме METAR. Приведен анализ поведения оценок качества прогнозов QNH в зависимости от сезонов года и территорий. Выполнено сравнение полученных оценок с прогнозами QNH, представленными участниками испытаний, по глобальной модели Гидрометцентра России T169L31, а также с инерционным методом. На основании результатов испытаний даны рекомендации по использованию прогностической продукции по данным модели WRF-ARW для территорий Восточной Сибири и Дальнего Востока России.

Ключевые слова: прогноз, давление, приведенное к уровню моря по стандартной атмосфере, результаты испытаний.

Табл. 7. Ил. 9. Библ. 7.

УДК 551.509.313+551.509.54

Результаты испытаний различных версий метода расчета балла облачности по выходной продукции модели WRF-ARW / Вербицкая Е.М., Романский С.О. // Информационный сборник № 45 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2018 – С. 54-69.

Приведены результаты оперативно-производственных испытаний численных прогнозов общего балла облачности и по ярусам в пунктах Восточной Сибири и Дальнего Востока России. Расчеты балла облачности выполнялись по выходной продукции модели WRF-ARW с горизонтальным разрешением 15 км. Рассматривались прогнозы балла облачности по двум методам – встроенному в постпроцессинг Unified Post Processor модели WRF-ARW и по модифицированному методу. Прогнозы балла облачности в пунктах сравнивались с данными наблюдений, поступающих в кодовых формах КН-01 и КН-04. Приведено сравнение и анализ данных наблюдений за баллом облачности от различных наблюдательных платформ. Представлен анализ поведения оценок качества прогнозов балла облачности в зависимости от сезонов года. На основании результатов испытаний даны рекомендации по использованию прогностической информации о балле облачности для УГМС Дальневосточного региона России.

Ключевые слова: метод расчета, балл облачности, результаты испытаний.

Табл. 11. Ил. 2. Библ. 14.

УДК 551.5:001.891

Результаты испытаний новой оперативной технологии прогноза гроз / Токарев В.М., Здерева М.Я., Хлучина Н.А., Воробьева Л.П., Бабошина Н.А. // Информационный сборник № 45 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2018 – С. 70-84.

На базе 4-летних архивов наблюдений о грозах на территории Урало-Сибирского региона и прогностических сеточных данных моделей COSMO-Ru_Sib и NCEP(GFS) разработаны алгоритмы и универсальная методика построения прогностических решающих правил для распознавания гроз с различной пространственно-временной детальностью и заблаговременностью. Разработанная методология применена для расчетов вариантов прогностических решающих правил различной детальности для каждой из 430 метеостанций Урало-Сибирского региона. Программное обеспечение расчета прогнозов на базе полученных решений встроено в оперативную технологическую линию статистического пост-процессинга в ЗСРИВЦ. В статье представлены результаты оперативных испытаний данной методологии на территории ответственности ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС».

Ключевые слова: прогноз гроз, распознавание образов, бинарное дерево решений, критерии оценки прогнозов

Табл. 10. Ил. 2. Библ. 6.

УДК 551.509.33:551.509.313

О результатах совместных оперативных испытаний технологии детализации-розованных по времени ансамблевых долгосрочных прогнозов на основе глобальных моделей Гидрометцентра России и ГГО им. А.И. Воейкова / Киктев Д.Б., Толстых М.А., Зарипов Р.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Мелешко В.П., Мирвис В.М., Львова Т.Ю, Матюгин В.А. // Информационный сборник № 45 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2018 – С. 85-102.

Представлены результаты совместных испытаний технологии ансамблевых прогнозов на срок до 45 суток с недельной временной детализацией для первого прогностического месяца на основе моделей ПЛАВ (ГМЦ) и Т63L25 (ГГО). Комплект выходной продукции включает глобальные прогностические поля (по сетке 2,5°×2,5°) величины аномалии и вероятностей трех градаций (ниже нормы, норма, выше нормы) для пяти метеорологических характеристик: геопотенциала поверхности 500 гПа (H-500), давления на уровне моря (SLP), температуры воздуха на уровне 850 гПа (T-850) и у Земли (TRSF), а также интенсивности атмосферных осадков (PREC). Для Северо-Евразийского региона предусмотрена детализация прогнозов приземной температуры воздуха и количества осадков по сети 70 пунктов. Оценки успешности детерминированных (среднее по ансамблю) и вероятностных прогнозов свидетельствуют о наличии полезного сигнала для большинства метеорологических величин во внетропических широтах – на недельных (в ряде случаев до 2–3 недель) и месячных интервалах времени, в тропических широтах – на всех периодах прогноза. Исключение представляют осадки, прогнозы которых за пределами недельного интервала являются малоинформативными. Использование мультимодельного ансамбля в ряде случаев позволяет повысить качество прогнозов, особенно при прогнозе осадков и атмосферного давления.

Ключевые слова: гидродинамические прогнозы, мультимодельные ансамбли, синоптико-статистическая интерпретация, верификация прогнозов

Табл. 5. Ил. 6. Библ. 16.

УДК 551.509.313+551.509.327(265)

Автоматизированный метод краткосрочного (с заблаговременностью до 72 ч) прогноза положения тропических циклонов северо-западной части Тихого океана численной региональной моделью HWRF и результаты его испытания / Крохин В.В., Филь А.Ю., Евдокимова Л.И., Моисеев М.Б. // Информационный сборник № 45 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2018 – С. 103-116.

В статье рассмотрены результаты оперативных испытаний автоматизированного метода краткосрочного (с заблаговременностью до 72 ч) прогноза характеристик тропических циклонов (ТЦ) северо-западной части Тихого океана и реализующей его технологии HWRF-Ru. Принятое на основании испытаний решение ЦМКП от 20 июня 2017 г.: использовать в оперативно-прогностической работе дальневосточных территориальных управлений Росгидромета положения ТЦ в качестве основного метода, а прогнозы интенсивности ТЦ – в качестве консультативного.

Ключевые слова: численные прогнозы погоды, региональная мезомасштабная негидростатическая модель HWRF, Дальний Восток, тропические циклоны, численное моделирование тропических циклонов.

Табл. 4. Ил. 1. Библ. 8.

УДК 551.465

Метод долгосрочного прогноза ледовых условий в Татарском проливе, Охотском море и Беринговом морях, основанный на использовании статистического моделирования / Думанская И.О. // Информационный сборник № 45 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2018 – С. 117-126.

Представлено описание ансамблевого метода прогноза ледовых условий, состоящего из трех компонентов, а также результаты расчетов с его помощью. Определена эффективность работы метода. Ансамблевый метод ледового прогноза для Берингова моря, Охотского моря, Татарского пролива дал хороший результат (эффективность 22 % по сравнению с климатическим прогнозом), это позволяет использовать его в оперативной практике. Выявлены основные предикторы, оказывающие влияние на результат прогноза. Показано, что на результаты прогнозов ледовых условий в дальневосточных морях наибольшее влияние оказывают летнее давление в районе будущего Сибирского максимума и летние температуры воздуха в районе Берингова моря.

Ключевые слова: ледовые условия дальневосточных морей, первое появление льда, ледовитость моря, очищение моря ото льда, продолжительность ледового периода, долгосрочный ледовый прогноз.

Табл. 7. Ил. 2. Библ. 14.

146

УДК 631. 559: 551.509.32

Результаты испытания метода оценки условий вегетации и прогноза урожайности кукурузы с использованием спутниковой и наземной информации по субъектам Российской Федерации / Гончарова Т.А., Найдина Т.А., Лебедева В.М., Береза О.В. // Информационный сборник № 45 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2018 – С. 127-135.

В статье рассмотрены результаты авторских и производственных испытаний в Гидрометцентре России метода прогноза урожайности кукурузы с использованием спутниковой и наземной информации по субъектам РФ. В качестве базовой модели для разработки метода прогноза урожайности кукурузы на зерно используется динамико-статистическая модель «погода – урожай», разработанная во ВНИИСХМ. Создана технология оперативного прогнозирования урожайности кукурузы на зерно по основным кукурузосеющим субъектам Российской Федерации. Методы прогноза урожайности кукурузы успешно прошли испытания и внедрены в оперативных подразделениях ФГБУ «Гидрометцентр России» и ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС».

Ключевые слова: метод оценки условий вегетации кукурузы, метод прогноза урожайности кукурузы, использование спутниковой информации, динамико-статистическая модель, результаты испытаний.

Табл. 3. Ил. 2. Библ. 13

УДК 631. 559: 633.11

Результаты испытания метода долгосрочного прогноза урожайности яровой пшеницы по федеральным округам и России в целом / Лебедева В.М., Береза О.В. // Информационный сборник № 45 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2018 – С. 136-142.

Представлены результаты авторских и производственных испытаний в ФГБУ «Гидрометцентр России» синоптико-статистического метода долгосрочного прогноза урожайности яровой пшеницы по федеральным округам и России в целом. В основе синоптико-статистического метода лежит использование длиннопериодных связей параметров циркуляции атмосферы Северного полушария, что позволило увеличить заблаговременность прогноза до пяти месяцев.

Ключевые слова: метод, долгосрочный прогноз урожайности, яровая пшеница, циркуляция атмосферы, температура поверхности океанов, методика, результаты испытаний.

Табл. 2. Ил. 3. Библ. 11.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Муравьев А.В., Киктев Д.Б., Смирнов А.В.</i> Оперативная технология наукастинга осадков на основе радарных данных и результаты верификации для теплого периода года (май-сентябрь 2017 года)	3
<i>Вербицкая Е.М., Романский С.О.</i> Результаты испытаний метода краткосрочного (до 48 ч) прогноза значений давления, приведенного к уровню моря по стандартной атмосфере, в пунктах и по территории Дальневосточного региона России по данным модели WRF-ARW с горизонтальным разрешением 15 км	31
<i>Вербицкая Е.М., Романский С.О.</i> Результаты испытаний различных версий метода расчета балла облачности по выходной продукции модели WRF-ARW	54
<i>Токарев В.М., Здерева М.Я., Хлучина Н.А., Воробьева Л.П., Бабошина Н.А.</i> Результаты испытаний новой оперативной технологии прогноза гроз	70
<i>Киктев Д.Б., Толстых М.А., Зарипов Р.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Мелешко В.П., Мирвис В.М., Львова Т.Ю, Матюгин В.А.</i> О результатах совместных оперативных испытаний технологии детализированных по времени ансамблевых долгосрочных прогнозов на основе глобальных моделей Гидрометцентра России и ГГО им. А.И. Воейкова	85
<i>Крохин В.В., Филь А.Ю., Евдокимова Л.И., Моисеев М.Б.</i> Автоматизированный метод краткосрочного (с заблаговременностью до 72 ч) прогноза положения тропических циклонов северо-западной части Тихого океана численной региональной моделью HWRF и результаты его испытания	103
<i>Думанская И.О.</i> Метод долгосрочного прогноза ледовых условий в Татарском проливе, Охотском море и Беринговом морях, основанный на использовании статистического моделирования	117
<i>Гончарова Т.А., Найдина Т.А., Лебедева В.М., Береза О.В.</i> Результаты испытания метода оценки условий вегетации и прогноза урожайности кукурузы с использованием спутниковой и наземной информации по субъектам Российской Федерации	127
<i>Лебедева В.М., Береза О.В.</i> Результаты испытания метода долгосрочного прогноза урожайности яровой пшеницы по федеральным округам и России в целом	136